Bescherelle

CHRONOLOGIE

L'HISTOIRE DES SCIENCES

Des origines à nos jours

Hatier

Bescherelle

CHRONOLOGIE

L'HISTOIRE DES SCIENCES

Des origines à nos jours

Sous la direction de David Aubin et Néstor Herran

Santiago Aragon
Maître de conférences en biologie animale et histoire des sciences, responsable de la collection de zoologie, Sorbonne Université

David Aubin
Professeur d'histoire des sciences, Sorbonne Université, Institut de mathématiques de Jussieu-Paris Rive Gauche

Hélène Gaget
Maître de conférences en informatique et philosophie des sciences, Sorbonne Université

Alexandre Guilbaud
Maître de conférences en histoire des sciences mathématiques, Sorbonne Université, Institut de mathématiques de Jussieu-Paris Rive Gauche

Néstor Herran
Maître de conférences en histoire des sciences, Sorbonne Université, Observatoire des sciences de l'univers Ecce Terra

Christophe Lécuyer
Professeur d'histoire des techniques, Sorbonne Université, Laboratoire d'informatique LIP6

Hatier

Les auteurs

Santiago Aragon, David Aubin, Hélène Gaget, Alexandre Guilbaud, Néstor Herran et Christophe Lécuyer sont membres de l'Atelier Sciences – Histoire – Cité (ASHiC), de la faculté des sciences de Sorbonne Université.

David Aubin et Néstor Herran : frises chronologiques, introductions, dossiers.

Santiago Aragon : – 2600, – 500, – 450, 77, 250, 1158, 1241, 1543, p. 114, 1628, 1655, 1666, p. 138, 1735, 1739, 1768, 1796, 1799, 1804, 1809, 1859, p. 228 et p. 230, 1865, p. 232 et p. 234, 1888, p. 254, 1897, 1910, 1928, 1959, 1966, 1972, 1985.

David Aubin : – 687, – 60, 80, 127, 415, 597, 1021, 1230, 1269, 1280, 1304, 1368, 1417, 1482, 1600, 1614, 1626, 1666, p. 140, 1684, 1736, 1745, 1774, 1794, 1801, 1814, 1830, 1859, p. 226, 1871, 1900, 1908, 1915, 1929, 1934, 1944, 1963

David Aubin et Alexandre Guilbaud : 833, 1696.

Hélène Gaget : – 3000, – 540, – 430, – 240, 132, 636, 999, 1154, 1277, 1543, p. 112, 1644, 1687, 1756, 1761, 1785, 1791, 1820, 1833, 1835, 1843, 1847, 1888, p. 252, 1945, p. 298, 1947, 1958, 1968, 1969, p. 328, 1977, p. 334, 1992, 2001.

Alexandre Guilbaud : – 300, 1751.

Néstor Herran : 1166, 1493, 1503, 1527, 1610, 1633, 1659, 1784, 1789, 1800, 1810, 1816, 1824, p. 212, 1869, 1895, p. 256 et p. 258, 1898, 1905, 1909, 1919, 1932, 1945, p. 300, 1949, 1953, 1954, 1957, 1962, 1983, 1986, 1990.

Christophe Lécuyer : – 25, 1448, 1556, 1620, 1769, p. 174 et 176, 1824, p. 210, 1856, 1876, 1956, 1969, p. 326, 1977, p. 332, 2012, 2017.

Les auteurs tiennent à remercier pour leur aide Andrea Bréard, Karine Chemla, Dylan Courtin, Tony Freeth, Isabel Iribarren, Leopoldo Iribarren et Marc Moyon, ainsi que Laurianne Geffroy et Christophe Vescovacci.

Conception et mise en page : Laurent Romano
Édition : Laurianne Geffroy
Iconographie : Hatier Illustration / Éliane Usaï, Chloé Gouyet et Julie Sirdey
Relecture : Monika Gabay

© Hatier, Paris 2019

Sous réserve des exceptions légales, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, faite, par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit, est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par le Code de la Propriété Intellectuelle. Le CFC est le seul habilité à délivrer des autorisations de reproduction par reprographie, sous réserve en cas d'utilisation aux fi ns de vente, de location, de publicité ou de promotion de l'accord de l'auteur ou des ayants droit.

Avant-propos

La chronologie est la science qui cherche à établir les dates des événements passés. C'est le guide qui nous permet de domestiquer les temps anciens et de nous y repérer. Cette conception qui date de la Renaissance reste d'actualité, même si le défi principal, pour ce qui concerne l'histoire des sciences, est aujourd'hui moins de dater les événements que de sélectionner les plus aptes à en faire comprendre les enjeux.

Ce que nous avons voulu faire

Nous vivons une période charnière de l'histoire de notre planète, qu'on nomme l'anthropocène, où l'espèce humaine prend conscience de l'impact global qu'elle a sur la Terre. Notre chronologie de l'histoire des sciences et des techniques, cherche donc, dans un sens large, à éclairer le chemin qui nous y a mené.

Les sciences et les techniques reflètent les enjeux culturels propres à chaque époque. Elles s'appuient sur des idées et des concepts, bien sûr, mais aussi sur des pratiques d'observation, des expériences, des instruments, des modes de communication dont nous avons essayé de rendre compte. Surtout, elles sont indissociables des hommes et des femmes aux prises avec le monde naturel, mais aussi avec les questions d'ordre social ou politique qui agitent leur vie.

Au-delà des « génies de la science » sur lesquels on insiste trop souvent, nous avons voulu dessiner l'aventure collective de la recherche scientifique, ainsi que les mécanismes de transmission et d'appropriation des savoirs, y compris au sein d'un large public. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les recherches historiques les plus récentes et avons privilégié les sources de première main.

Comment l'ouvrage est organisé

Les six grandes parties de cet ouvrage correspondent aux phases de la mondialisation et de l'industrialisation des sociétés humaines, comme autant d'étapes sur le chemin de l'anthropocène. Chaque section débute par une brève introduction et une frise chronologique illustrée. Évoqué de manière vivante, chacun des événements est mis en perspective de façon que le lecteur en perçoive les enjeux. Des documents visuels ainsi que des encadrés viennent compléter ce récit. En fin de section, les dossiers permettent d'approfondir des aspects fondamentaux de l'histoire des sciences et des techniques et de les replacer dans une perspective culturelle ou sociale plus large.

À vous qui partez à la découverte des sciences passées et présentes, nous offrons cette chronologie comme un guide de voyage… en espérant qu'elle vous aide parfois à sortir des sentiers battus.

Les auteurs

Sommaire

Aux origines des sciences
3000 av. notre ère-700

INTRODUCTION ET FRISE CHRONOLOGIQUE 12

– 3000 À Uruk, les scribes tiennent leurs comptes 16

– 2600 Une impératrice domestique le ver à soie 18

– 687 Un astronome copie un catalogue d'étoiles 20

– 540 Anaximandre soustrait la Terre aux mains des Dieux 22

– 500 Alcméon expérimente la médecine 24

– 450 Les contours de l'embryon humain se dessinent 26

– 430 Démocrite imagine un monde d'atomes 28

– 300 Euclide rédige ses *Éléments* de mathématiques 30

– 240 À Alexandrie, un bibliothécaire mesure la taille de la Terre 32

– 60 La machine d'Anticythère sombre en mer 34

– 25 Vitruve consigne l'art de bâtir à la romaine 36

77 Pline l'Ancien compile l'*Histoire* de son époque 38

80 La boussole se cherche un inventeur 40

127 Ptolémée observe Saturne d'un nouvel œil 42

132 Zhang Heng convoque des dragons pour détecter les séismes 44

250 Un fabuleux bestiaire donne des leçons aux chrétiens 46

415 Assassinée, Hypatie devient immortelle 48

597 Une arme chinoise fait tomber Thessalonique 50

636 Isidore de Séville sauvegarde l'héritage antique 52

Dossier **Les sciences et le temps** 54

Dossier **Les savoir médicaux en Europe** 56

Des savoirs qu'on s'échange
700-1500

INTRODUCTION ET FRISE CHRONOLOGIQUE 60

833 Al-Khwarizmi invente l'algèbre 64

999 Un pape est inspiré par les chiffres arabes 66

1021 Alhazen offre une nouvelle vision de l'optique 68

1154 Un géographe dessine le monde pour le roi de Sicile 70

1158 Une sainte célèbre la pharmacie du Bon Dieu 72

1166 Averroès achève son encyclopédie médicale 74

1230 Villard de Honnecourt croque avec passion les cathédrales 76

1241 L'empereur Frédéric II consacre la fauconnerie 78

1269 Pierre de Maricourt est attiré par l'aimant 80

1277 L'évêque de Paris croise le fer avec l'université de Paris 82

1280 L'empereur de Chine accorde les saisons 84

1304 L'arc-en-ciel se révèle dans une goutte d'eau 86

1368 L'horloge mécanique se dévoile avec poésie 88

1417 À l'aube de la Renaissance, le Pogge redécouvre Lucrèce 90

1448 Gutenberg crée le premier atelier d'imprimerie 92

1482 Léonard de Vinci innove sur tous les fronts 94

Dossier **Traduire les sciences** 96

Dossier **Dénombrer, compter, calculer** 98

De nouveaux mondes, de nouvelles sciences 1500-1770

INTRODUCTION ET FRISE CHRONOLOGIQUE 102

1493 Les épidémies colonisent l'Amérique 106

1503 La Couronne espagnole organise l'exploration du Nouveau Monde 108

1527 À Bâle, Paracelse critique la médecine de Galien 110

1543 Copernic place la Terre en orbite 112

1543 André Vésale étudie l'anatomie des meurtriers 114

1556 Agricola décrit l'art de la métallurgie 116

1600 Les applications militaires fortifient la géométrie 118

1610 Galilée se fait messager céleste 120

1614 John Napier invente les logarithmes 122

1620 Un chancelier anglais imagine la science du futur 124

1626 Des missionnaires font découvrir la lunette aux Chinois 126

1628 Harvey dissipe les croyances sur la circulation sanguine 128

1633 Descartes imagine un nouveau Monde 130

1644 Torricelli n'a pas horreur du vide 132

1655 Un médecin danois expose la nature du monde 134

1659 Boyle et Hooke expérimentent le vide 136

1666 Le roi réunit les savants dans sa bibliothèque 138

1666 Marie Meurdrac publie *La Chymie charitable et facile* 140

1684 La machine de Marly alimente les fontaines de Versailles 142

1687 Newton pose les principes mathématiques de la physique 144

1696 L'Hospital analyse les infiniment petits 146

1735 Linné met de l'ordre dans la nature 148

1736 Des astronomes mesurent la Terre au bout du monde 150

1739 Buffon cultive le Jardin du roi et le savoir 152

1745 Euler se lance dans la balistique 154

1751 L'*Encyclopédie* devient l'étendard des Lumières 156

1756 Une marquise explique Newton aux Français 158

1761 Un horloger anglais sauve la Navy 160

1768 James Cook dessine les contours du Pacifique 162

Dossier **La « découverte » des longitudes** 164

Dossier **Les nouveaux instruments de la science** 166

Des sciences pour l'industrie 1770-1870

INTRODUCTION ET FRISE CHRONOLOGIQUE 170

1769 Watt dépose un brevet pour une machine à vapeur 174
1769 Un perruquier anglais brevette un métier à filer 176
1774 Turgot dirige un gouvernement « éclairé par la science » 178
1784 Les académiciens rejettent le magnétisme animal 180
1785 Coulomb « pèse » l'électricité 182
1789 Lavoisier révolutionne la chimie 184
1791 La Terre donne naissance au mètre 186
1794 Sophie Germain fait des maths sous un pseudo 188
1796 Un jeune garçon échappe à la variole grâce à une vache 190
1799 Un naturaliste se fait écologue 192
1800 Volta invente la pile électrique 194
1801 Gauss minimise les erreurs et retrouve une planète 196
1804 Une faune éteinte reprend vie à Montmartre 198
1809 Pour Lamarck, les espèces sont plastiques 200
1810 Une université moderne voit le jour à Berlin 202
1814 Laplace décrit un monde où tout est joué d'avance 204
1816 Une jeune anglaise imagine une créature artificielle 206
1820 Un apothicaire fait tourner les aiguilles d'une boussole 208
1824 Un inventeur élabore le « système américain de production » 210
1824 Justus Liebig enseigne la chimie sur la paillasse 212
1830 Auguste Comte donne des cours d'astronomie populaire 214
1833 Charles Lyell vieillit la Terre de centaines de millions d'années 216
1835 Adolphe Quetelet invente l'homme « moyen » 218
1843 Un brasseur associe mouvement et chaleur 220
1847 Un obstétricien hongrois se lave les mains 222
1856 Un étudiant fabrique de la mauvéine 224
1859 Bunsen et Kirchhoff décodent les messages de la lumière 226
1859 Pasteur met fin à la génération spontanée 228
1859 La théorie de Darwin fait évoluer les idées sur la vie 230
1865 Un prêtre dévoile les secrets de l'hérédité 232
1865 Un vent nouveau souffle sur la vie 234
1869 Mendeleïev met en ordre les éléments 236

Dossier L'avènement de l'énergie 238
Dossier Les publics de la science 240

L'empire des sciences 1870-1945

INTRODUCTION ET FRISE CHRONOLOGIQUE 244

1871 Une mission japonaise étudie les sciences occidentales 248

1876 Edison se lance dans la recherche industrielle 250

1888 Hertz émet de bonnes ondes 252

1888 Un médecin espagnol peint des neurones 254

1895 Wilhelm Röntgen effectue la première radiographie 256

1895 Svante Arrhenius annonce le réchauffement de la planète 258

1897 Pavlov fait baver les chiens 260

1898 Pierre et Marie Curie découvrent des éléments radioactifs 262

1900 À la Sorbonne, un mathématicien pose problèmes 264

1905 Einstein vit une année extraordinaire 266

1908 Le mathématicien Painlevé fait décoller l'aviation 268

1909 Fritz Haber invente un procédé chimique explosif 270

1910 Thomas Morgan regarde les mouches dans les yeux 272

1915 L'État prend la recherche scientifique en main 274

1919 Une éclipse de Soleil consacre la relativité d'Einstein 276

1928 Fleming découvre la pénicilline par hasard 278

1929 Edwin Hubble observe l'Univers en expansion 280

1932 Le cyclotron accélère la recherche nucléaire 282

1934 Bourbaki naît dans un café parisien 284

1944 L'économie devient un jeu 286

Dossier **La théorie synthétique de l'évolution** 288

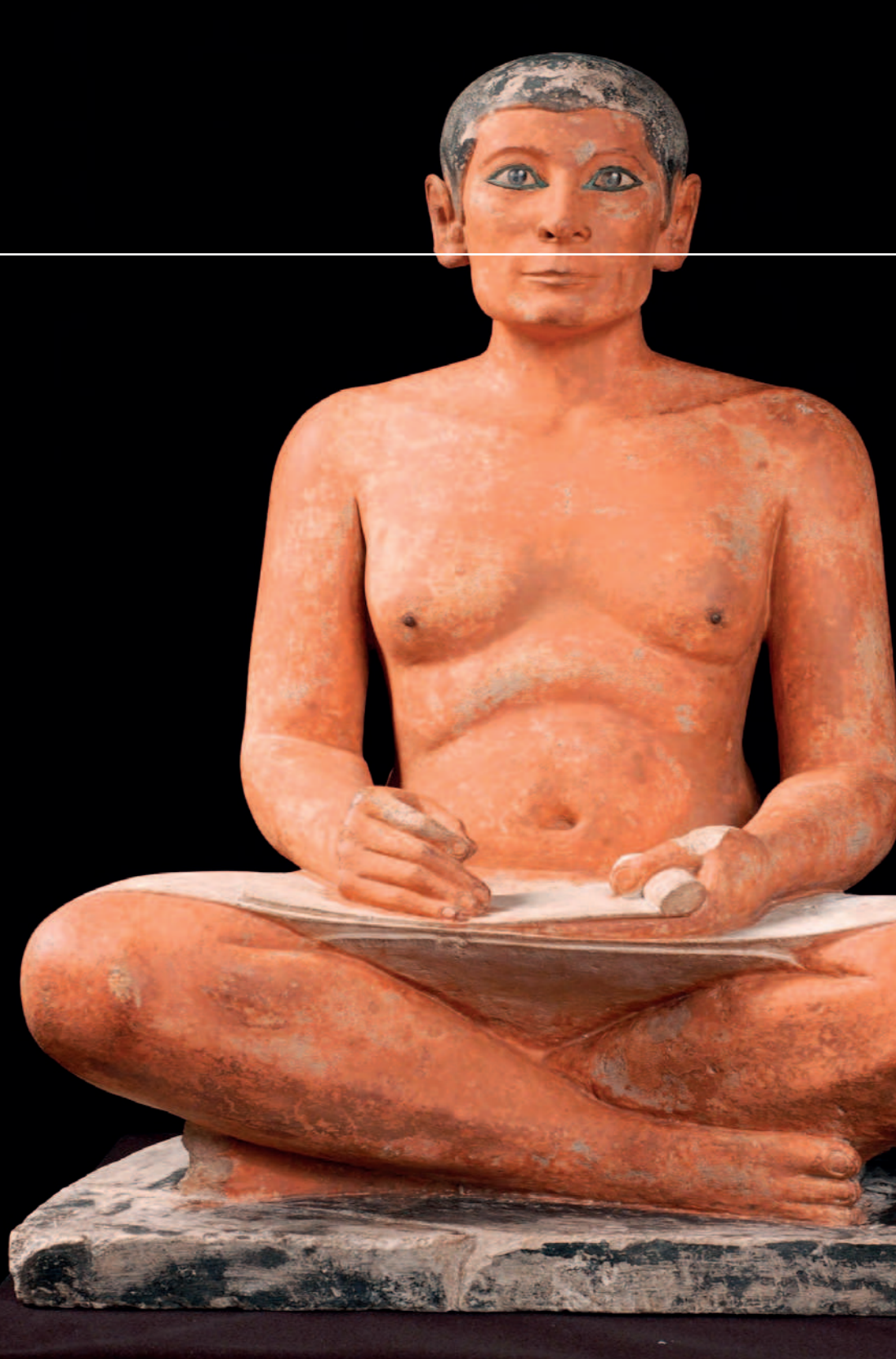
Dossier **La nouvelle physique de l'infiniment petit** 290

La grande accélération
De 1945 à nos jours

INTRODUCTION ET FRISE CHRONOLOGIQUE 294

1945 L'architecture de l'ordinateur se dessine 298
1945 Une bombe atomique explose en plein désert 300
1947 La compagnie Bell Telephone invente le transistor 302
1949 La radioactivité dévoile l'âge des momies 304
1953 Les biologistes décryptent l'alphabet du vivant 306
1954 La pilule contraceptive est créée en toute discrétion 308
1956 Les conteneurs bouleversent les transports 310
1957 L'année géophysique internationale lance la conquête de l'espace 312
1958 Georges Mathé sauve des physiciens irradiés 314
1959 Un crâne et quelques traces de pas changent l'histoire de l'humanité 316
1962 Rachel Carson annonce un printemps silencieux 318
1963 Edward Lorenz découvre le chaos dans les ailes d'un papillon 320
1966 Lynn Margulis fait rimer évolution avec coopération 322
1968 La tectonique des plaques fait dériver les continents 324
1969 Les militaires américains créent ARPANET 326
1969 Deux hommes marchent sur la Lune 328
1972 La médecine traditionnelle chinoise offre un cadeau au monde 330
1977 Avec l'Apple II, les micro-ordinateurs se popularisent 332
1977 Deux sondes voguent jusqu'aux confins du Système solaire 334
1983 Le CERN détecte les bosons W et Z 336
1985 Dian Fossey est assassinée au Rwanda 338
1986 Le réacteur nucléaire de Tchernobyl explose 340
1990 La Terre se réchauffe... vraiment 342
1992 Un pulsar révèle ses propres planètes 344
2001 L'encyclopédie collaborative Wikipédia voit le jour 346
2012 CRISPR révolutionne la biotechnologie 348
2017 AlphaZero bat Stockfish aux échecs 350
Dossier **L'ordinateur décode le monde** 352
Dossier **Les utopies de la technoscience** 354

Pour aller plus loin 358
Index des noms, des notions et des lieux 359

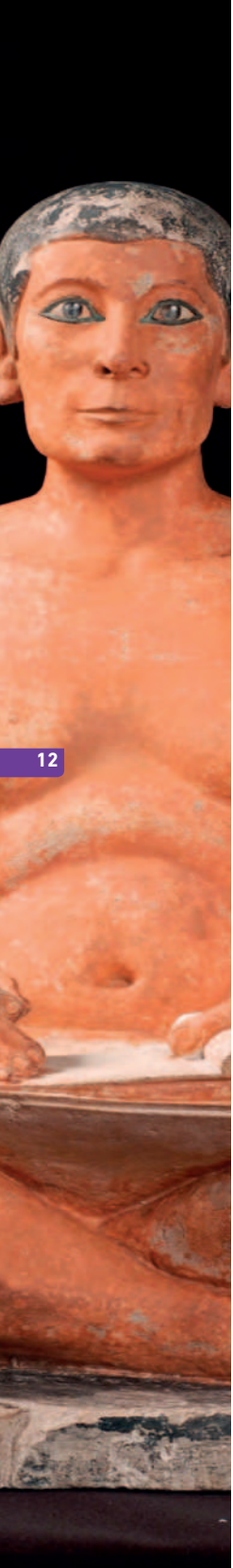


Aux origines des sciences

3000 av. notre ère–700

Homo sapiens, homo faber **: l'être humain pense et façonne le monde depuis qu'il foule la Terre. Avec l'agriculture et l'élevage apparaissent des civilisations urbaines qui inventent l'écriture, l'architecture, la médecine, les mathématiques, la guerre, etc. En certains lieux, comme en Mésopotamie, en Égypte ou en Chine, des écoles où l'on cherche à organiser et à transmettre ces savoirs et savoir-faire sont créées. Puis avec les penseurs grecs, vers le VI^e^ siècle avant notre ère, naît une soif inextinguible d'expliquer rationnellement le monde. Poursuivi pendant des siècles, repris par les Romains, cet héritage est le socle des sciences modernes.**

Le scribe accroupi, environ 2400 av. notre ère.



Aux origines des sciences

3000 av. notre ère–700

Au début était la technique

D'après les archéologues, des êtres humains taillaient déjà la pierre il y a près de 3 millions d'années pour en faire des outils. Ces gestes étaient-ils conscients ? Difficile à dire. Mais, dès cette époque, l'évolution biologique de l'être humain s'accompagne d'un progrès technique qui ne s'arrêtera plus. Si la domestication du feu constitue évidemment une étape déterminante de cette évolution, les sculptures et les peintures rupestres, plus tardives, laissent entrevoir les manifestations d'un esprit désireux de représenter le monde qui l'entoure afin de mieux le comprendre et de mieux le contrôler. N'est-ce pas là, déjà, les prémices des sciences et des techniques ?

Des champs, des villes et des écoles

Il y a environ 12 500 ans, autre étape décisive : la révolution néolithique. Dans le Croissant fertile, de la Mésopotamie à l'Égypte, l'agriculture et l'élevage naissants permettent le développement de techniques comme la céramique et le travail des métaux. En Chine, on domestique le ver à soie (► – 2600). Partout où éclot la civilisation, de grandes villes sont construites et des systèmes d'écriture se développent (► – 3000). Les savants compilent minutieusement les observations astronomiques (► – 687) et, peu à peu, les savoirs se structurent et sont transmis de génération en génération dans les écoles de scribes. Une quête de la connaissance scientifique a définitivement commencé.

Un monde intelligible

Entre le VII^e^ et le V^e^ siècle avant notre ère, dans plusieurs civilisations, le savoir s'incarne à travers des figures semi-mythiques. Thalès de Milet, Confucius, Pythagore ou le Bouddha développent ainsi, chacun à sa manière, des règles de vie, mais aussi une pensée théorique qui s'interroge sur l'origine du monde. À Milet, Anaximandre abandonne les mythes et propose des explications rationnelles (► – 540). D'autres, comme Démocrite, imaginent que tout est constitué de petits bouts de matière insécables, les atomes (► – 430). Le monde serait donc intelligible, et la raison humaine pourrait, à partir d'un petit nombre de principes fondamentaux, en percer les mystères.

Le foisonnement des savoirs de l'Antiquité

Deux siècles plus tard, à Athènes, Platon et Aristote produisent des œuvres philosophiques complexes, inspirées de cet héritage et parvenues presque intactes jusqu'à nous. Les écrits de l'Antiquité grecque puis romaine permettent de dessiner les contours d'une civilisation où le savoir rationnel est valorisé et prend des formes de plus en plus sophistiquées. L'exemple le plus accompli en est sans doute les mathématiques, organisées par Euclide (► – 300), puis mises au service de la géographie (► – 240) et de l'astronomie (► – 60 et 127). Mais les savoirs naturels sont aussi mis en forme, comme en témoigne l'œuvre de Pline l'Ancien (► 77). Cette rationalité s'applique aussi, avec plus ou moins d'efficacité, à la médecine (► dossier, p. 56-57), au génie civil (► – 25), à la construction de machines de guerre (► 597), ou même à la gouvernance des États.

Vers – 3000
Des calculs sur
des tablettes à Uruk

– 687
Catalogue d'étoiles
en Mésopotamie

– 3000 – 2500 – 2000 – 1500 – 1000

– 2900 à – 2340 Dynasties archaïques (Uruk)

– 1793 à –1750
Règne d'Hammourabi à Babylone

– 2700 à – 2600 Huangdi, l'empereur jaune

– 1301 à –1236 Ramsès II

Vers – 2600
Domestication du
vers à soie en Chine

Vers – 540
Nouvelle conception du
monde par Anaximandre

Vers – 500
Dissection du corps
humain par Alcméon

Vers – 450
Description
de l'embryon humain

Vers – 430
Vision atomiste du monde par Démocrite

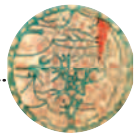
Vers – 300
Euclide, *Éléments*

– 240
Calcul de la circonférence de la Terre par Ératosthène

Vers 80
Invention de la boussole

415
Hypatie, femme de sciences

636
Isidore de Séville, *Étymologies*



– 500 | An 0 | 500 | 1000

– 206 à 220 Dynastie des Han (Chine)

– 626 à – 539 Empire néo-babylonien

Chute de Troie 1184

– 495 à – 429 Périclès : apogée d'Athènes

753 Fondation de Rome

– 356 à – 323 Alexandre le Grand

– 100 à – 44 Jules César

– 5 à 30 Jésus-Christ

– 27 à 476 Empire romain d'Occident

250
Publication du bestiaire *Physiologus*

Vers – 60
Machine d'Anticythère

132
Détection de séismes à distance

597
Diffusion du trébuchet

– 25
Traité d'architecture de Vitruve

77
Pline l'Ancien, *Histoire naturelle*

127
Première observation astronomique par Ptolémée

– 3000

À Uruk, les scribes tiennent leurs comptes

Des milliers de tablettes d'argile, produites vers 3000 avant notre ère, ont été retrouvées à Uruk, en Mésopotamie. Gravées par des scribes et leurs élèves, elles portent les traces du système de numération et témoignent d'un savoir mathématique élaboré.

Pour ne pas perdre la mémoire

À la fin du Néolithique, une révolution transforme le visage de la Mésopotamie. Les premières grandes villes fleurissent dans cette région fertile traversée par le Tigre et l'Euphrate, dans le sud de l'actuel Irak. Ces grands centres urbains, à l'organisation sociale et politique complexe, sont des lieux d'intenses échanges de biens et de marchandises.

C'est dans ce contexte que les premières traces écrites de calculs sont produites sur de petites tablettes en argile, sans doute pour garder la mémoire d'opérations comptables. Les scribes, hauts fonctionnaires de l'époque, y notent par exemple combien de *gu* (environ 30 kilos) ou de *ban* (environ 10 litres) de produits céréaliers et laitiers ont été achetés pour une fête, établissent des inventaires de troupeaux ou encore réalisent des calculs prévisionnels de rendements.

Aux sources des mathématiques

Quelque 5 000 tablettes d'argile ont ainsi été exhumées à Uruk, agglomération majeure de la Mésopotamie, mais aussi à Nippur vers 3000 avant notre ère. À l'aide de roseaux, les chiffres sont notés par des encoches et les noms (de personnes, d'animaux ou de denrées) sont figurés par des dessins ou des pictogrammes. Un système de graphies qui évoluera peu à peu vers l'écriture cunéiforme.

Ces tablettes nous apprennent que les scribes calculent en base 60 et maîtrisent les quatre opérations. En outre, elles révèlent l'existence de traditions mathématiques élaborées : on sait résoudre des équations du 1er et 2e degré ou encore extraire des racines carrées avec une grande précision.

La découverte de nombreuses tablettes scolaires atteste également de la multiplication des écoles de scribes, nécessaires à la normalisation et à la diffusion des signes, des unités de mesure et des procédés de calculs. On constate en effet une remarquable continuité des traditions mathématiques à travers les régions et le temps, et ce, malgré l'histoire mouvementée des cités-États de Mésopotamie au cours du IIIe millénaire.

La numération des Babyloniens

Le système abstrait de notation en base 60 utilisé par les scribes d'Uruk est hérité de celui des Sumériens. Deux signes sont utilisés :
le 1 𒁹 et le 10 𒌋. Les 59 « chiffres » sont écrits en répétant ces signes. Par exemple 21 s'écrit 𒌋𒌋𒁹.
Les soixantaines s'écrivent par ajout de chiffres à gauche.
Ainsi 𒁹𒁹𒌋𒌋𒁹 vaut $2 \times 60 + 2 \times 10 + 1 = 141$.
Le zéro n'existe pas. L'ordre de grandeur se déduit du contexte, ce qui fait que le signe 𒁹 peut signifier 1, 60 ou $\frac{1}{60}$.
Cette numération est dite sexagésimale positionnelle relative.

Tablette Plimpton 322 représentant 15 triplets de nombres entiers a, b et c qui vérifient la relation $a^2 + b^2 = c^2$, vers 1800 av. notre ère.

À l'école des scribes

La découverte, à Nippur, de nombreuses tablettes de textes scolaires, de listes métrologiques, de tables numériques… permet non seulement de reconstituer les savoirs de l'époque mais également de comprendre comment leur transmission s'effectuait dans les écoles ou « Maisons des tablettes ». Les restes de milliers de « brouillons » d'argile nous apprennent ainsi que, vers 2000 avant notre ère, le cursus de formation des scribes était divisé en deux niveaux de compétences. Au niveau élémentaire, les élèves s'entraînaient à la copie de listes de mots et au calcul. Au niveau avancé, ils rédigeaient en sumérien et résolvaient des problèmes numériques élaborés (extraction de racine, factorisation, etc.).

– 2600

Une impératrice domestique le ver à soie

Xi Lingshi (Leizu)
XXVII^e siècle av. notre ère

C'est l'impératrice Leizu qui, selon la légende, a l'idée de domestiquer le ver à soie. Dès lors, la Chine conserve l'exclusivité de la fabrication du précieux fil pendant plus de deux millénaires, avant qu'il ne s'exporte par la « route de la soie ».

Un cocon dans une tasse de thé

L'histoire de la domestication du ver à soie est tellement ancienne que son origine se perd dans la nuit des temps. D'après les écrits de Confucius (vers 551-479 av. notre ère), on raconte que l'impératrice Leizu fait une découverte extraordinaire en observant un cocon de papillon tomber accidentellement dans son thé.

Voulant l'extraire de sa boisson, la jeune fille déroule le fil du cocon et a l'idée de le tisser. Ayant observé la vie de ce papillon, le bombyx du mûrier, elle commence à enseigner l'art de son élevage, la sériciculture, et à récolter les cocons pour en extraire la soie. Nous sommes alors au XXVII^e siècle avant notre ère, dans la région du fleuve Jaune.

Le chemin de la domestication

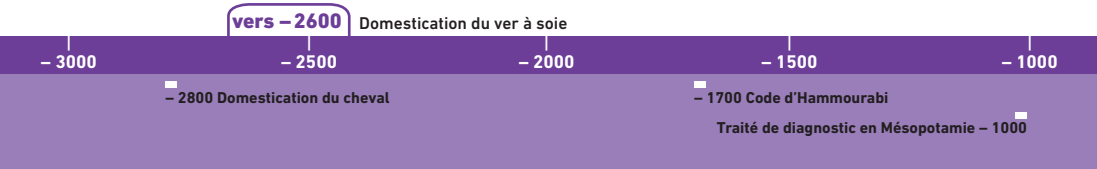
Cette légende symbolise ainsi la naissance de l'élevage en captivité. La dépendance du vers à soie vis-à-vis de l'homme pour accomplir son cycle de vie – celui-ci étant incapable de redevenir sauvage – reflète l'ancienneté de sa domestication. Cette légende illustre aussi les connaissances et le savoir-faire nécessaires à la domestication des animaux et des plantes utiles au développement des sociétés humaines.

La soie devient peu à peu une matière de luxe appréciée des pays étrangers. Le précieux fil, longtemps resté l'exclusivité de la Chine, commence à s'exporter à partir du II^e siècle avant notre ère.

La route de la soie

Le commerce de la soie est ainsi à l'origine de la célèbre « route de la soie », l'une des premières voies commerciales entre l'Orient et l'Occident. La sériciculture arrive alors en Europe occidentale au Moyen Âge, en Espagne puis en Italie à travers la culture arabe.

Mais le fil de soie n'est pas le seul à voyager à travers le monde. En suivant sa route, les savoirs commencent à se diffuser sur de longues distances et l'Europe découvre des inventions chinoises comme la poudre ou la boussole (► 82).



L'art de la sériciculture

La production de la soie commence par la sélection des œufs de papillon. Après l'éclosion de ces « graines », les vers sont nourris sur des feuilles de mûrier pendant six semaines environ. Les cocons sont collectés et la vapeur d'eau utilisée pour tuer les chrysalides enfermées à l'intérieur. Les cocons sont ensuite séchés avant d'être plongés dans de l'eau chaude non bouillante (90 °C). C'est à ce moment-là que la filature commence.

Atelier traditionnel japonais de sériciculture.

La domestication d'espèces utiles

Le bœuf, le cochon ou le chien sont déjà domestiqués au V^e^ millénaire avant notre ère dans l'ancienne Mésopotamie ou l'Égypte des pharaons. De même, dès le III^e^ millénaire avant notre ère, les Chinois domestiquent de nombreuses espèces comme la carpe ou le ginkgo et développent une médecine traditionnelle riche en remèdes naturels. Mais depuis ces temps reculés et jusqu'au XIX^e^ siècle, peu de nouvelles espèces sont domestiquées. C'est ainsi, pour pallier ce retard historique, qu'Isidore Geoffroy Saint-Hilaire (1805-1861) fonde en 1854, à Paris, la Société zoologique d'acclimatation. Son objectif est alors d'obtenir, *via* la domestication, d'autres sources de matières premières pour l'industrie et le bien-être de la population.

« De ces temps primitifs dont la fable nous a seule conservé quelque vague souvenir, jusqu'à l'antiquité historique, et de celle-ci aux temps modernes, on voit décroître les efforts faits pour la domestication. »

Isidore Geoffroy Saint-Hilaire, *Acclimatation et domestication des animaux utiles*, 1861.

Sciences naturelles et médecine

– 500 | An 0 | 500 | 1000

– 580 Acuponcture en Chine

– 460 à – 377 Hippocrate

– 384 à – 322 Aristote

77 Pline, *Histoire naturelle*

131 à 201 Galien

– 687

Un astronome copie un catalogue d'étoiles

En Mésopotamie antique, le savoir astronomique est stratégique car il sert à la fabrication du calendrier et aux présages. Certaines tablettes d'argile de cette époque livrent un savoir déjà étonnamment avancé.

Le texte de La Charrue

En 687 avant notre ère, à Assur, en Mésopotamie (dans le nord de l'actuel Irak), un scribe trace minutieusement dans l'argile un texte astronomique. Il s'agit de l'un des premiers qu'on puisse dater avec précision. Composé de près de 400 lignes de caractères cunéiformes, ce texte, connu à travers plusieurs copies, compile des savoirs astronomiques qui remontent à 1 400 ans avant notre ère. Les assyriologues appellent MUL.APIN cette série de tablettes, d'après le nom de la constellation de « La Charrue » (aujourd'hui la Grande Ourse) citée au début de chaque copie.

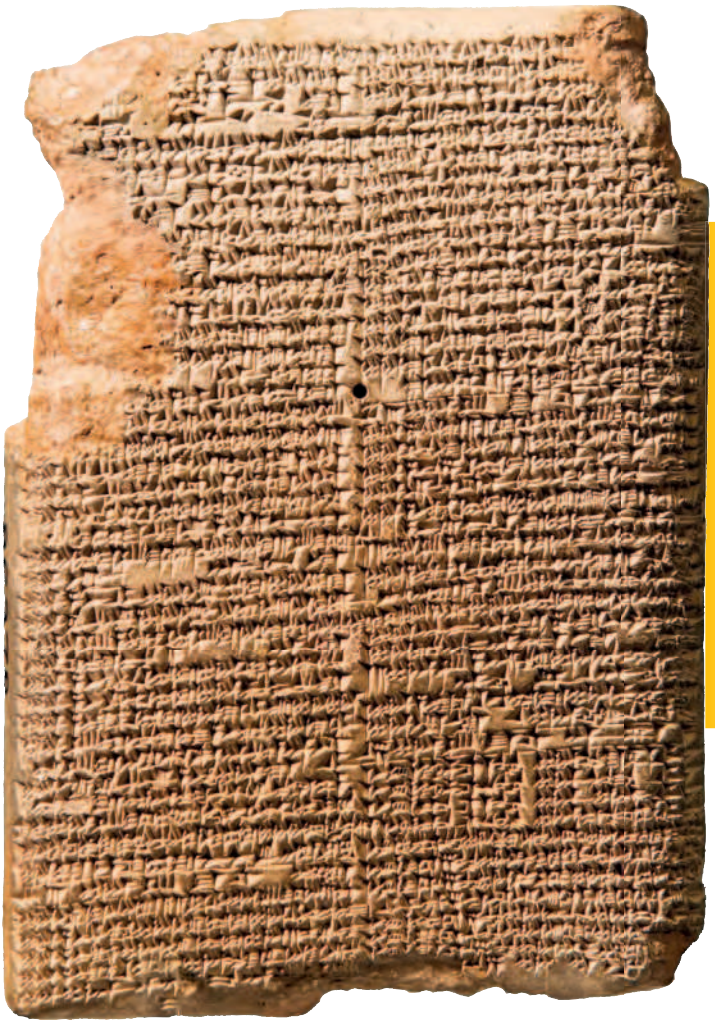
Un catalogue d'étoiles

Les tablettes MUL.APIN délivrent des informations astronomiques diverses, toujours dans le même ordre. Pour commencer, une liste de 36 étoiles dont le lever au-dessus de l'horizon permet de définir un calendrier idéal de 360 jours. Puis viennent des données concernant le mouvement apparent de ces étoiles, de la Lune, du Soleil et des cinq planètes connues à cette époque (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne). Certaines pratiques algorithmiques permettant le calcul des calendriers solaire et lunaire sont également précisées.

> *« Tablette secrète du Ciel, connaissance exclusive des grands dieux, ne pas divulguer ! On peut l'enseigner au fils qu'on aime. L'enseigner à un scribe de Babylone [...] ou à tout autre savant est une abomination pour [les dieux] Nabu et Nisaba. »*
>
> Extrait d'une tablette de Mésopotamie, Ier millénaire av. notre ère.

À ne pas mettre entre toutes les mains !

Ce type de tablettes a été retrouvé dans les ruines de Babylone, au milieu de véritables bibliothèques comprenant des journaux quotidiens d'observation du ciel, des compilations mensuelles, des méthodes permettant d'ajuster le calendrier, ainsi que divers manuels de prédictions astrologiques. Grâce à ces connaissances, les savants délivraient de précieux conseils aux gouvernants, leur révélant la période propice aux semis… ou au déclenchement d'une guerre !



Des étoiles dans l'argile

Lorsque le hasard a voulu qu'elles soient enterrées, les tablettes d'argile se sont remarquablement bien conservées. Si bien qu'on possède aujourd'hui une connaissance de première main de la science mésopotamienne, bien meilleure parfois que celle d'autres périodes pourtant plus récentes. Conservée au British Museum de Londres, cette tablette MUL.APIN datée de – 687 a permis de reconstituer certaines pratiques astronomiques qui remontent à 1 400 ans avant notre ère.

Tablette cunéiforme MUL.APIN, – 687.

Entre astrologie et astronomie

L'astronomie est la science qui rend compte, par l'observation des astres, de l'organisation physique de l'Univers et de ses régularités. L'astrologie, quant à elle, est une ancienne croyance qui cherche à interpréter les correspondances entre les mouvements célestes et les affaires humaines. On ne peut nier que de telles correspondances existent bel et bien, comme la relation entre le cycle annuel solaire et le rythme des saisons, à l'origine du calendrier. Dès la haute Antiquité, les sociétés humaines ont cependant voulu croire que ce type de correspondance pouvait s'étendre à la santé des êtres humains ou aux affaires de l'État. Aussi, les deux pratiques sont difficiles à distinguer l'une de l'autre avant le début du XVII^e siècle de notre ère.

– 687 Catalogue d'étoiles en Mésopotamie

– 500 **An 0** **500** **1000**

– 590 à – 495 Pythagore

– 625 à – 546 Thalès

– 300 Euclide, *Éléments*

v. – 287 à – 212 Archimède

150 Ptolémée (II^e siècle), *L'Almageste*

250 Diophante (v. 215-290), *Arithmétiques*

– 540

Anaximandre soustrait la Terre aux mains des dieux

Anaximandre de Milet
vers 610-547 av. notre ère

Anaximandre, penseur grec du VIe siècle avant notre ère, abandonne la mythologie pour expliquer l'organisation du monde. Il suggère, en adoptant une approche rationnelle, que notre Terre est isolée et immobile au centre du monde.

Aux origines de l'esprit critique

Au VIIIe siècle avant notre ère, Homère dans l'*Iliade* et l'*Odyssée* et surtout Hésiode dans sa *Théogonie* racontent la naissance des dieux et du monde. Même si l'observation céleste est pratique courante, le fondement du savoir se trouve ailleurs : dans les récits mythologiques et le divin, qui confèrent au monde ordre et cohérence.

C'est au début du VIe siècle avant notre ère, dans une petite cité des bords de la Méditerranée baptisée Milet, qu'apparaît une nouvelle manière d'enquêter sur la nature. Les premiers penseurs de cette cité – Thalès, Anaximandre et Anaximène – cherchent à déterminer le principe de toute chose et émettent des hypothèses rationnelles pour expliquer le monde qui les entoure.

Certes ni l'usage de la raison ni la science ne sont nés à Milet, mais la nouvelle vision du monde proposée par Anaximandre, probablement élève de Thalès, transforme incontestablement la philosophie de la nature.

Une révolution cosmologique

Si pour Thalès la Terre flotte au centre d'un immense océan, pour Anaximandre, elle se tient immobile au centre du monde, suspendue dans l'espace. Autour d'elle tournent plusieurs sphères percées de trous, d'où nous parvient la lumière des étoiles, de la Lune et du Soleil.

> *« Selon moi cette idée d'Anaximandre est l'une des idées les plus audacieuses, les plus révolutionnaires de toute l'histoire de la pensée humaine ».*
>
> Karl Popper, *The World of Parmenides, Essays on the Presocratic Enlightenment*, 1998.

Mais qu'est-ce qui tient la Terre ? Pourquoi ne tombe-t-elle pas ? Anaximandre explique qu'elle reste ainsi immobile car elle n'a aucune raison de se mouvoir dans une direction particulière, toutes étant équivalentes. Il supprime la voûte céleste supportée par Atlas, donnant aux cieux suffisamment de profondeur pour permettre l'indépendance des mouvements des étoiles, du Soleil et de la Lune. Le monde, expliqué en termes naturels et mécanistes, est ainsi dirigé par la nécessité et non par le hasard ou les caprices divins.

Mathématiques et astronomie

– 3000 | – 2500 | – 2000 | – 1500 | – 1000

– 3100 à – 2800 Début de la construction de Stonehenge

– 3000 Tablettes comptables à Uruk

– 2000 Notation des nombres en base 60

Papyrus de Rhind, les mathématiques en Égypte – 1550

– 1400 Premiers catalogues d'étoiles en Mésopotamie

Le monde selon Anaximandre

La Terre a la forme d'un cylindre trois fois plus large que haut, l'humanité vivant sur l'une de ses faces bombées. Elle est immobile au centre de trois anneaux en rotation. Des trous percés dans ces anneaux laissent passer la lumière et nous permettent de voir respectivement les étoiles, la Lune et le Soleil. La distance de ces anneaux à la Terre est issue de la *Théogonie* d'Hésiode.

Mosaïque grecque de pavement représentant Anaximandre, III^e^ siècle av. notre ère.

Un saut conceptuel

Anaximandre, en proposant un modèle rationnel du monde dans lequel les événements trouvent des explications naturelles, ne se contente pas d'ignorer les récits mythologiques qui expliquent l'histoire de la Terre. Il réalise une prouesse conceptuelle en passant d'un système où la Terre repose sur l'eau (celui de Thalès) à une Terre en équilibre dans l'espace. En effet, cette transformation suppose d'accepter que certains phénomènes se réalisent même si nous ne les voyons pas, et de dépasser l'expérience de nos perceptions quotidiennes. Ainsi, le Soleil continue sa course même s'il disparaît chaque soir de notre champ de vision.

Vers – 540 Nouvelle conception du monde par Anaximandre

– 500 | An 0 | 500 | 1000

– 590 à – 495 Pythagore

– 625 à – 546 Thalès

– 300 Euclide, *Éléments*

v. – 287 à – 212 Archimède

150 Ptolémée (II^e^ siècle), *L'Almageste*

250 Diophante (v. 215-290), *Arithmétiques*

– 500

Alcméon expérimente la médecine

Alcméon
VIe siècle av. notre ère

En Occident, un médecin ose pratiquer des dissections sur le corps humain, alors « sacré ». Ses réflexions, basées sur l'observation et non plus les croyances, amorcent une nouvelle façon d'interroger le monde.

Les temples de la guérison

D'après la mythologie grecque, Asclépios est le dieu de la médecine. Dans les temples qui lui sont dédiés, la guérison passe par des rituels basés sur l'intuition et l'ésotérisme. C'est vers la fin du Ve siècle que l'observation remplace les croyances, et que les premières écoles de médecine se développent autour de ces sanctuaires. Celle de Crotone est associée à la figure d'Alcméon, l'un des fondateurs de la médecine avec Hippocrate (460-vers 377 av. notre ère).

Le corps et l'âme se dissocient

Alcméon de Crotone refuse de croire à l'origine présumée divine des troubles, comme on le pensait à l'époque. Si l'âme est immortelle, le corps, lui, est périssable et soumis aux maladies. Pour Alcméon, la santé résulte ainsi d'une symétrie dans le corps entre des « forces » opposées (humide et sec, froid et chaud, doux et amer…), et c'est le déséquilibre entre ces forces qui entraîne la maladie. Le médecin raisonne à partir de l'étude des symptômes de chaque pathologie et, *a posteriori*, en suivant les effets du diagnostic et du traitement sur les patients.

Des dissections instructives

Alcméon semble être le premier médecin à réaliser des dissections sur des animaux et des humains. Il identifie ainsi le système nerveux comme le siège de la vie intellectuelle, de la perception sensorielle et de la conscience des hommes et des femmes.

> *« Ce qui distingue l'homme des autres animaux, c'est qu'il est le seul à disposer de la conscience, alors que les autres ont des sensations sans avoir la conscience. »*
>
> Théophraste, *Du sens et des sensibles*, IIIe siècle av. notre ère.

Grâce aux dissections de l'œil et de l'oreille, il démontre que ces organes sensoriels informent le cerveau de tout ce qui se passe autour de nous. Et ses études lui permettent aussi de mettre en évidence les nerfs optiques et la trompe d'Eustache de l'oreille, ce « couloir » où circulent les informations.

Sciences naturelles et médecine

– 3000 | – 2500 | – 2000 | – 1500 | – 1000

– 2800 Domestication du cheval
– 2600 Domestication du ver à soie
– 1700 Code d'Hammourabi
Traité de diagnostic en Mésopotamie – 1000

« Il faut donc expliquer quelle est la nature de l'œil ; à ce sujet, entre autres très nombreux penseurs, Alcméon de Crotone — spécialiste des recherches sur la nature et le premier à avoir osé pratiquer une dissection —, Callisthène, le disciple d'Aristote, et aussi Hérophile ont fait la lumière sur de nombreux points importants. »

Calcidius, commentaire du *Timée* de Platon, IVe siècle.

Comparer pour mieux expliquer

Alcméon de Crotone explique le fonctionnement des organes sensoriels par des analogies. Pour lui, on peut voir des objets parce que les yeux sont humides et que les images s'y reflètent comme à la surface de l'eau. Pour expliquer l'audition, il fait une analogie avec l'écho : on entend les sons parce qu'il existe une cavité à l'intérieur de l'oreille qui permet de faire résonner l'air provenant de l'extérieur.

Un corpus à plusieurs mains

Le *Corpus hippocraticum*, rédigé entre le Ve et le IVe siècle avant notre ère, est considéré comme le premier recueil bibliographique en médecine. Œuvre d'Hippocrate et d'autres auteurs non identifiés, le *Corpus* réunit les pensées et les procédés de deux écoles de médecine de l'Antiquité grecque, celle de Cos et celle de Cnide. Il traite de la nature des maladies, de pharmacologie, de diététique, des fluides corporels, de chirurgie ou de l'influence de l'environnement sur la santé. Cependant, c'est le serment d'Hippocrate, code de conduite et de règles morales du médecin face au patient, qui restera dans les mémoires (► dossier, p. 56-57).

– 500 Dissection du corps humain par Alcméon

– 500 | An 0 | 500 | 1000

– 580 Acuponcture en Chine

– 460 à – 377 Hippocrate

– 384 à – 322 Aristote

77 Pline, *Histoire naturelle*

131 à 201 Galien

– 450

Les contours de l'embryon humain se dessinent

Hippon de Crotone
460-377 av. notre ère

Devançant Aristote et Hippocrate, un philosophe grec peu connu, du nom d'Hippon de Crotone, fait une première description des étapes de développement de l'embryon humain.

Les premières théories de la vie

À partir du VI^e siècle avant notre ère, les premiers philosophes de la nature cherchent à donner une explication raisonnée aux phénomènes naturels, et notamment aux origines de la vie. Parmi eux se trouve Hippon de Crotone, personnage très peu connu et dont l'existence même est parfois remise en cause, pour qui l'eau ou plutôt l'humide est à l'origine de toute chose, y compris du feu.

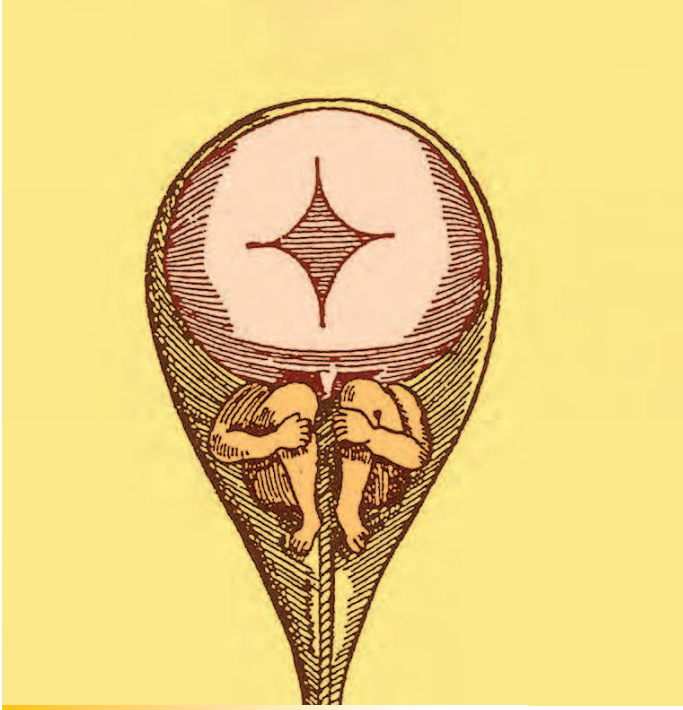
Considéré par Aristote (384-322 av. notre ère) comme un philosophe « grossier », Hippon décrit le ciel comme la voûte d'un four qui enveloppe la Terre. Il semble aussi avoir été l'un des premiers à discuter de la génération d'un nouveau corps. Censorin, grammairien latin du III^e siècle, lui attribue, en effet, la première description de la formation de l'embryon humain dans son traité sur la naissance *De die natali* (Du jour natal).

Un développement embryonnaire… sexué

D'après le témoignage d'Hippon, au V^e siècle avant notre ère, seule la semence mâle est utile pour produire l'embryon, la semence femelle ne servant qu'à son développement. Cette idée sera reprise plus tard par Aristote, pour qui la semence mâle apporte la forme, autrement dit ce qui est éternel au cours des générations et constitue la particularité de chaque espèce, et la semence femelle apporte la matière, commune et périssable après la mort, qui permet la croissance. Une telle conception sera utilisée, dans la tradition occidentale, pour affirmer une suprématie masculine.

Pour Hippon, 60 jours suffisent à la formation de l'embryon, à commencer par la tête, siège de l'âme. Aristote prédira de son côté un développement de 40 jours pour les garçons et de 3 mois pour les filles !

> *« Hippon […] soutient que l'enfant est formé soixante jours après la conception, ajoutant que dans le quatrième mois la chair prend sa consistance, dans le cinquième poussent les ongles et les cheveux, et dans le septième l'enfant est parvenu à sa perfection. »*
>
> Censorin, *Du jour natal*, vers 238.



L'origine de la vie en débat

Dans la tradition gréco-latine, deux écoles s'affrontent pour expliquer le développement des animaux, et notamment de l'homme. D'une part les « préformationistes », inspirés par Hippocrate (460-377 av. notre ère), pour qui le sperme contient déjà en soi un organisme préformé. Face à eux, les « épigénistes », héritiers de la pensée d'Aristote, qui conçoivent le sperme comme une force qui aboutit d'abord à la formation de l'embryon puis à celle de l'adulte.

Représentation d'un spermatozoïde humain qui contient dans sa tête un « homunculus », sorte de petit homme préformé, extrait de *Essay de dioptrique* de Nicolas Hartsoeker, 1694.

« Si un fœtus mâle sort à quarante jours, et qu'on le mette dans un autre liquide que de l'eau froide, il se dissout et disparaît ; mais si c'est dans de l'eau froide qu'on le met, il y reste condensé comme dans une membrane. Quand on ouvre cette membrane, l'embryon y apparaît de la grosseur des grandes fourmis. »

Aristote, *Histoire des animaux*, tome II, IVe siècle av. notre ère.

Les premiers pas de l'embryologie

Dans son traité *De la Génération des animaux*, daté du IVe siècle avant notre ère, Aristote décrit en détail le développement de l'œuf de poule. Cette étude est considérée comme l'une des premières expériences scientifiques de l'histoire. C'est ensuite au milieu du XVIIe siècle qu'une étape importante est franchie dans l'histoire de l'embryologie avec la rédaction de *Exercitationes de generatione animalium* par le médecin anglais William Harvey (► 1628). Celui-ci y établit que « tout ce qui vit vient initialement d'un œuf ». L'embryologie moderne devient enfin une discipline scientifique à part entière au XIXe siècle.

Vers – 450 Description de l'embryon humain

– 500 | An 0 | 500 | 1000

– 580 Acuponcture en Chine

– 460 à – 377 Hippocrate

– 384 à – 322 Aristote

77 Pline, *Histoire naturelle*

131 à 201 Galien

– 430

Démocrite imagine un monde d'atomes

Démocrite
vers 460-370 av. notre ère

Un philosophe grec conçoit la matière du monde comme discontinue, faite d'atomes et de vide. La transformation de la matière pourrait ainsi s'expliquer par les lois de la nature et non par les lois divines.

La chute des dieux

Au Ve siècle avant notre ère, les mythes de la culture grecque commencent réellement à perdre leur force explicative du monde au sein de l'élite intellectuelle. On cherche davantage à interpréter les phénomènes par la raison. Ainsi, Anaximandre (► – 540) a déjà proposé une organisation du cosmos régie par des règles naturelles.

Démocrite, disciple de Leucippe (vers 460-370 av. notre ère), reprend cette idée et considère que la matière n'est constituée que de petits éléments insécables, appelés « atomes », et de vide. Tout est matière, même les dieux qui sont ainsi soumis aux mêmes lois que les hommes.

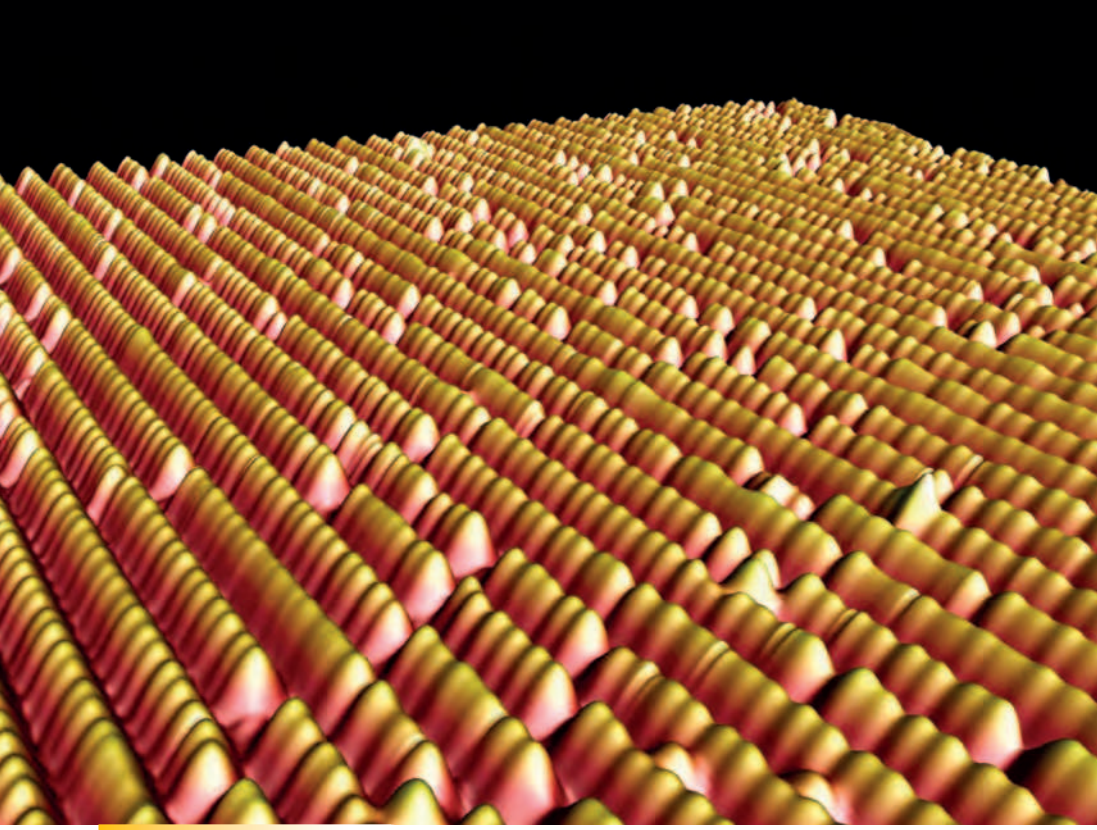
Le plein, le vide et le mouvement

Selon Démocrite, les principes du réel sont le plein (l'être) constitué d'atomes, le vide (le non-être) et le mouvement. Les atomes sont invisibles du fait de leur taille infime, aucune lame n'étant assez fine pour les diviser. Tous les corps présents dans le monde, même les quatre éléments (terre, eau, air et feu), sont formés d'agrégats d'atomes. La génération de matière se fait par la réunion d'atomes, et la destruction de matière par leur séparation. Par le vide nécessaire entre les atomes, Démocrite explique la possibilité du changement. Tout ce qui survient dans le monde se ramène donc à l'universelle nécessité des principes atomistes.

De la conviction à la preuve

D'autres philosophes comme Épicure (341-270 av. notre ère) ou Lucrèce (► 1417) se placent dans la lignée de Leucippe et de Démocrite et défendent l'existence des atomes. Par conviction, Robert Boyle et Newton (► 1687) au XVIIe siècle, puis Dalton au XVIIIe siècle, soutiennent eux aussi le corpuscularisme.

Mais ce n'est qu'en 1913 que le physicien Jean Perrin clôt le débat avec la publication d'un livre, *Les Atomes*, dans lequel il accumule des preuves expérimentales en faveur de l'existence des atomes. Les physiciens commencent même à s'intéresser à leurs divers composants : électrons, protons et bientôt neutrons (► 1932).



Les atomes crochus de Démocrite

Pour Démocrite, la diversité de la matière est liée aux propriétés des atomes. Leur forme notamment, qui peut être ronde, anguleuse ou « crochue », leur permet de se lier entre eux par de petites barbes et des crochets. La quantité de vide entre les atomes affecte la texture, qui peut être fluide, ferme, etc. Une dernière catégorie, subjective, de propriétés comme la couleur et le goût influe sur les sensations que nous avons des corps.

Atomes d'or observés au microscope à effet tunnel, XXIe siècle.

Une vision matérialiste

Démocrite considère que tout est matière. Atome ou vide sont aussi réels l'un que l'autre, et le néant n'existe pas. « Rien ne naît de rien et rien ne retourne au néant », selon Épicure. Ainsi, le divin « s'efface » et l'âme se matérialise. Pour cette raison, bien des savants ou philosophes atomistes sont inquiétés à diverses époques par les autorités religieuses. L'Église catholique a longtemps combattu cette conception des corps, la jugeant incompatible avec la transsubstantiation, c'est-à-dire le changement du vin et du pain en sang et en corps du Christ lors de l'Eucharistie.

Vers – 430 Vision atomiste du monde par Démocrite

– 500 | An 0 | 500 | 1000

v. – 700 à – 800 Homère

– 587 à – 495 Pythagore

– 460 à – 370 Démocrite

– 428 à – 348 Platon

v. 54 Lucrèce, *De la nature des choses*

v. 500 Boèce, *De la musique*

636 Isidore de Séville, *Étymologies*

– 300

Euclide rédige ses *Éléments* de mathématiques

Euclide
vers 300 av. notre ère

Grâce à leur construction logique toute particulière, les *Éléments* d'Euclide ont exercé une influence considérable sur le développement des mathématiques au cours des deux millénaires suivants.

Un héritage singulier

Nous ne savons quasiment rien d'Euclide, mis à part qu'il vécut vers 300 av. notre ère. Une partie de ses œuvres, parmi lesquels les célèbres *Éléments*, lui ont néanmoins survécu. Si ce traité compile des résultats mathématiques, nous ne disposons d'aucune indication directe sur la façon dont il a été construit à partir du savoir de l'époque. Le texte n'en constitue pas moins un ouvrage de référence, qui a éclipsé l'ensemble des contributions mathématiques grecques précédentes.

L'art de la démonstration

Le principe d'exposition des *Éléments* d'Euclide consiste à démontrer chaque proposition – qui peut prendre la forme d'un théorème ou de la solution d'un problème – à partir d'autres propositions préalablement démontrées et d'un jeu réduit de définitions, de « demandes » (postulats) et de « notions communes » (axiomes). C'est cette façon de démontrer et de structurer les mathématiques qui en ont fait un succès sans équivalent dans l'histoire, en même temps qu'un modèle de rigueur jusqu'au XIXe siècle.

Géométrie et arithmétique

Les *Éléments* d'Euclide contiennent treize livres organisés de façon thématique, dédiés à la géométrie plane, l'arithmétique et la géométrie dans l'espace. Au total, 470 propositions sont ainsi démontrées. On y trouve par exemple une étude sur les nombres premiers, une méthode de construction du plus grand diviseur commun à deux nombres, ou encore des procédés de division des nombres.

Parmi les postulats du premier livre des *Éléments*, le cinquième, appelé « postulat des parallèles », est celui qui a le plus interrogé les mathématiciens, ces derniers ayant cherché à le prouver rigoureusement. Nous en connaissons tous un énoncé équivalent, formulé par le mathématicien britannique John Playfair (1748-1819) : « Par un point extérieur à une droite ne peut passer qu'une seule et unique droite parallèle à cette droite ». Il faudra attendre le XIXe siècle pour comprendre que ce postulat n'est pas démontrable.

Élémentaire mais pas originale !

Comme la plupart des écrits grecs de cette période, nous ne disposons d'aucune version originale des *Éléments*. Les versions actuelles du texte sont donc la compilation de nombreuses versions ultérieures, souvent traduites. Le plus vieux manuscrit complet des *Éléments*, actuellement conservé à Oxford, date de la fin du IXe siècle, soit environ 1 200 ans après sa période de rédaction.

Euclide, *Éléments*, 888.

Les 13 livres des *Éléments*

Livre I à IV	Géométrie plane : constructions et propriétés des figures rectilignes et des cercles.
Livre V	Théorie des proportions, rapports de deux grandeurs.
Livre VI	Application du livre V aux grandeurs de la géométrie plane.
Livre VII à IX	Arithmétique des nombres entiers : nombres premiers, PGCD, division euclidienne, algorithme d'Euclide…
Livre X	Classification des grandeurs irrationnelles.
Livre XI à XIII	Géométrie dans l'espace : parallélisme entre droites et plans, volumes des parallélépipèdes, solides de révolution, construction des polyèdres réguliers.

Vers – 300 Euclide, *Éléments*

– 500 | An 0 | 500 | 1000

– 590 à – 495 Pythagore

– 625 à – 546 Thalès

v. – 287 à – 212 Archimède

150 Ptolémée (IIe siècle), L'*Almageste*

250 Diophante (v. 215-290), *Arithmétiques*

– 240

À Alexandrie, un bibliothécaire mesure la taille de la Terre

Ératosthène
vers 284-
vers 192
av. notre ère

À partir de la distance entre les villes de Syène et d'Alexandrie et de leur position géographique, Ératosthène calcule la circonférence de la Terre et trouve une valeur très proche de celle actuellement admise.

Un homme sort de l'ombre

On sait depuis le v^e^ siècle avant notre ère que la Terre est sphérique. Mais pour calculer sa circonférence, il faut des connaissances en géométrie, en astronomie et en géographie. Ératosthène, responsable de la bibliothèque d'Alexandrie, maîtrise justement toutes ces disciplines. Il sait que le jour du solstice d'été, à midi, le Soleil passe à la verticale de la ville de Syène, en Égypte. Il sait aussi que cette ville se situe quasiment sur le même méridien qu'Alexandrie, ville où il va mener son expérience.

De l'ombre à la circonférence

Au solstice d'été donc, vers 240 avant notre ère, Ératosthène mesure la taille de l'ombre au sol d'un obélisque ou d'un gnomon à Alexandrie. En utilisant l'angle que forment les rayons du soleil avec la verticale, la distance entre les villes de Syène et d'Alexandrie, et des règles de trigonométrie bien choisies, il réussit à calculer la circonférence de la Terre.

Ératosthène n'a pas laissé d'écrit sur son expérience, et ceux qui la rapportent au siècle suivant donnent peu de précisions sur les méthodes de mesure utilisées. Si l'évaluation de l'angle pose peu de problèmes, qu'elle soit faite à partir de l'ombre d'un obélisque ou d'un gnomon, celle de la distance entre Syène et Alexandrie soulève de nombreuses questions.

Une précision remarquable

En effet, comment Ératosthène a-t-il mesuré cette distance ? A-t-il utilisé les dires des caravaniers qui évaluaient la distance en « chameaux-jours » ou bien les cartes cadastrales des arpenteurs égyptiens ? Impossible de le savoir. Quoi qu'il en soit, il donne une distance de 5 000 stades (unité de mesure de l'époque), ce qui correspondrait à une circonférence terrestre de 39 375 km, s'approchant, à 2 % près, de la valeur aujourd'hui admise de 40 075 km. Bien d'autres mesures sont faites pendant le millénaire qui suit, par les savants grecs, perses, arabes ou chinois. Mais aucune ne semble atteindre la même précision.

La bibliothèque d'Alexandrie

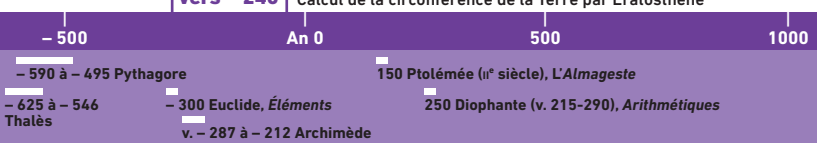
Vers l'an 245 avant notre ère, Ératosthène est appelé en Égypte pour assurer l'éducation de Ptolémée IV, le fils du pharaon, et à partir de –221, il devient conservateur de la bibliothèque d'Alexandrie. Ayant accès au plus grand centre culturel de l'époque, avec plus de 400 000 ouvrages disponibles (Sophocle, Euripide, Homère, Hippocrate et Aristote), Ératosthène se lance alors dans différents travaux qui le rendront célèbre.

Évocation de la bibliothèque d'Alexandrie, gravure d'Otto von Corven, vers 1886.

Une trop bonne mesure

Comment atteindre une aussi bonne mesure avec autant d'imprécisions ? En effet, Syène et Alexandrie ne sont pas exactement sur le même méridien, ce dont le calcul ne tient pas compte. D'autre part, la mesure de la distance Syène-Alexandrie, quelle que soit la méthode utilisée, est inévitablement approximative. Autre incertitude : l'unité de mesure utilisée par Ératosthène. Plusieurs sources (Pline, Strabon) laissent penser qu'il aurait utilisé non pas le stade égyptien de 157,2 m mais le stade attique de 184,98 m en usage parmi les géographes. Dans ce cas, le calcul d'Ératosthène surdimensionnerait la Terre de 16 % !

Vers – 240 Calcul de la circonférence de la Terre par Ératosthène



60 – La machine d'Anticythère sombre en mer

Au large d'une petite île grecque située entre la Crète et le Péloponnèse, un navire marchand fait naufrage. Vingt siècles plus tard, on trouve dans son épave un objet qui va radicalement changer l'image que l'on se fait des sciences mathématiques de l'époque hellénistique.

Un trésor sorti des eaux

Vers 60 avant notre ère, un navire, qui devait faire près de 40 mètres de long, sombre en Méditerranée au large de l'île d'Anticythère. En 1900, des pêcheurs d'éponges découvrent par hasard, dans les restes du bateau, de sublimes statues antiques. Aussitôt, les archéologues explorent l'épave et sont frappés par la richesse de la cargaison : amphores autrefois pleines de vin, somptueux objets de verre, magnifiques statues de bronze et de marbre… C'est à peine s'ils remarquent les mystérieux fragments d'un objet métallique, semblables à des engrenages.

Un siècle de recherches

Sur certains de ces fragments, des inscriptions difficiles à déchiffrer attirent l'attention : il s'agit manifestement d'un objet très particulier d'usage astronomique. Mais est-ce un simple astrolabe ou bien un mécanisme permettant de reproduire les mouvements du cosmos, voire de faire des calculs astronomiques et de prédire les éclipses ? Les travaux de plusieurs générations d'historiens, s'appuyant parfois sur des techniques d'imagerie sophistiquées, permettent de déchiffrer l'énigme. Il s'agit d'un cosmos portatif, véritable petit bijou de sciences et de technologie.

Un cosmos portatif

À l'aide d'une manivelle, il est possible d'actionner la machine d'Anticythère et de simuler le passage du temps et les mouvements célestes. Ses cadrans indiquent les jours selon trois calendriers différents, et des aiguilles donnent la position des étoiles et des planètes par rapport à la Terre.

Les engrenages qui l'animent sont essentiellement construits sur la base de la science mathématique et astronomique d'Apollonius de Perge (v. 240 av. notre ère), et permettent de calculer le mouvement apparent du Soleil, de la Lune et des planètes dans le ciel. Persuadés jusque-là de la prédominance de la théorie sur la pratique à l'époque antique, les historiens découvrent, avec la machine d'Anticythère, la subtilité d'un objet qu'ils pensaient impossible à réaliser à cette époque-là.

Des rouages astronomiques

On a tout d'abord pensé que ce disque était celui d'un astrolabe, instrument d'observation dont parlent les Anciens comme Ptolémée (► 127). Très vite, cependant, on a réalisé qu'il s'agissait d'engrenages dont subsistent une trentaine de roues. En se servant de techniques tomographiques (photographie par couches), les recherches les plus récentes ont pu donner une interprétation des calculs que pouvait effectuer la machine.

Reconstitution par le professeur Tony Freeth de la machine d'Anticythère, montrant les trajectoires du Soleil et des planètes inférieures.

Le théâtre des machines de Héron

La machine d'Anticythère incorpore de nombreuses connaissances techniques conformes à celles de la période hellénistique. En effet, elle présente le même niveau de savoirs que les inventions décrites par Héron, mathématicien et ingénieur d'Alexandrie au I^er^ siècle de notre ère. Dans ses *Pneumatiques*, ce dernier présente une machine à vapeur mise en mouvement par la puissance du feu. Et dans son *Traité des automates*, il dévoile des mécanismes qui actionnent des figurines animées. C'est aussi à Héron qu'on doit la description des cinq machines simples : le levier, la poulie, le coin, le treuil et la vis sans fin.

« Tout ce que nous connaissions des sciences et des techniques de l'âge hellénistique aurait dû nous inciter à penser qu'une telle machine ne pouvait pas exister. »

Derek de Solla Price, *Scientific American*, 1959.

Vers – 60 Machine d'Anticythère

– 500 | An 0 | 500 | 1000

– 447 Le Parthénon à Athènes

– 90 à – 20 Vitruve

597 Usage du trébuchet en Europe

Invention du papier en Chine – 200

80 Wang Chong, *Balance des discours*

25

Vitruve consigne l'art de bâtir à la romaine

Vitruve
90-20
av. notre ère

L'architecte romain Vitruve rassemble les règles et les savoirs architecturaux du Ier siècle avant notre ère dans l'ouvrage *De architectura*. D'abord destiné aux magistrats des villes romaines, ce traité sert de référence jusqu'au XVIIIe siècle.

Prestige en la demeure

Au Ier siècle avant notre ère, à Rome, les dirigeants politiques et les familles de la haute société manifestent leur pouvoir en édifiant de nouveaux bâtiments publics. L'empereur Auguste (63 av. notre ère-14) dirige lui-même un vaste programme d'embellissement de Rome. C'est dans ce contexte que Vitruve publie, vers 25 avant notre ère, son traité *De architectura*.

> *« Avec le secours de cet ouvrage qui renferme tout ce qui regarde l'architecture, vous pourrez juger par vous-même de la nature des travaux que vous avez faits, et de ceux que vous ferez encore [...]. »*
>
> Vitruve, *De architectura*, préface, Livre I, 25 av. notre ère.

Une bible de l'architecture

L'objectif de cet ouvrage en 10 volumes est de codifier tous les savoirs liés à l'architecture et de les rendre accessibles aux commanditaires de nouveaux bâtiments, afin qu'ils aient une bonne compréhension des problèmes techniques et puissent ainsi prendre les décisions adaptées.

Mais sa visée est aussi encyclopédique. Vitruve y traite de tout : des préceptes à utiliser dans la construction des villes ; des règles de conception des temples, maisons et bains publics ; des caractéristiques des matériaux de construction et des endroits où il est possible de les trouver. Vitruve propose aussi une classification des styles architecturaux, s'intéresse aux principes de l'acoustique et aux systèmes mécaniques.

Un engouement tardif

De architectura est l'unique traité d'architecture et de mécanique de l'Antiquité romaine qui nous soit parvenu. Peu cité par les auteurs latins et peu utilisé au Moyen Âge, le traité connaît un extraordinaire engouement à la Renaissance. Imprimé d'abord en latin en 1486, il est maintes fois traduit en français, italien et espagnol aux XVIe et XVIIe siècles. Il constitue alors le principal traité à l'usage des architectes : les règles qu'il préconise seront utilisées pour la conception de nombreux bâtiments jusqu'au XVIIIe siècle.

Le pont du Gard

Les architectes romains sont des constructeurs émérites. Le pont du Gard offre un excellent exemple de leur virtuosité. Construit quelques décennies après la publication de *De architectura*, il enjambe le Gardon et apporte les eaux des montagnes voisines aux fontaines et bains publics de Nîmes. D'une extraordinaire solidité, il survit à près de vingt siècles de crues du Gardon.

Architecte à la romaine

Comme beaucoup d'architectes romains, Vitruve est à la fois ingénieur militaire, ingénieur civil, spécialiste de mécanique et architecte au sens moderne du terme. Il sert ainsi Jules César en tant qu'ingénieur militaire pendant la guerre civile contre Pompée et conçoit notamment des scorpions qui servent à lancer de lourdes flèches. Plus tard, Vitruve construit un vaste bâtiment public dans la colonie Fanum Fortunae récemment fondée par l'empereur Auguste. Il travaille aussi sur le système d'adduction d'eau de Rome. À la fin de sa vie, il rédige *De architectura*, qu'il dédie à l'empereur Auguste.

– 25 Traité d'architecture de Vitruve

– 500 | An 0 | 500 | 1000

– 447 Le Parthénon à Athènes

– 90 à – 20 Vitruve

– 60 La machine d'Anticythère

597 Usage du trébuchet en Europe

Invention du papier en Chine – 200

80 Wang Chong, *Balance des discours*

77 Pline l'Ancien compile l'*Histoire* de son époque

Pline l'Ancien
23-79

La création de l'Empire romain permet le rayonnement de sa culture bien au-delà du pourtour méditerranéen. La compilation de connaissances faite par l'écrivain latin Pline l'Ancien, à travers son *Histoire naturelle*, contribue à cette expansion.

Un monde d'expansion et de compilation

Au Ier siècle de notre ère, l'Empire romain est en pleine croissance. Des ingénieurs perfectionnent l'urbanisme des villes, les voies de communication, l'agronomie et la métallurgie. En revanche, dans le domaine des sciences, les Romains s'inspirent essentiellement de la pensée grecque. La compilation est le genre le plus répandu.

Cicéron (106-43 av. notre ère) et Claude Galien (vers 131-vers 201) recueillent respectivement les savoirs des philosophes et des médecins grecs, assurant ainsi un rôle d'intermédiaires entre le monde classique et le Moyen Âge (► dossier, p. 56-57). De son côté, vers 77, Pline l'Ancien, écrivain et naturaliste au service de l'armée, réunit les savoirs de son époque dans une véritable encyclopédie.

Une encyclopédie entre naturel et surnaturel

Dans les trente-sept volumes qui composent son *Histoire naturelle*, Pline traite d'astronomie, de météorologie, de géographie, d'anthropologie, de zoologie, de botanique, d'agronomie, de médecine, de minéralogie, de métallurgie et des arts. Son *Histoire* ne relève pas du passé, comme on l'entend aujourd'hui, mais plutôt d'une enquête sur tout ce qui existe dans la nature. Et pour bien la conduire, il consulte de nombreux auteurs grecs et latins en complément de son expérience personnelle.

Pline semble parfois négliger son esprit critique pour parler de choses qu'il n'a pas vues. Il décrit certains phénomènes par ouï-dire, ce qui conduit le réel et l'imaginaire à cohabiter dans ses écrits. Ses descriptions nourrissent ainsi un monde peuplé de dragons et d'êtres imaginaires, un univers fantastique qui bénéficie du crédit que l'on accorde à son auteur et aura une influence durable jusqu'au XVIe siècle.

> *« Ce n'est pas chose aisée que de donner un air nouveau à ce qui est ancien, de l'autorité à ce qui est nouveau, du brillant à ce qui est terne, de la lumière à ce qui est obscur, de la faveur à ce qui est dédaigné, du crédit à ce qui est douteux, à chaque chose sa nature, et à la nature tout ce qui lui appartient. »*
>
> Pline l'Ancien, *Histoire naturelle*, vers 77.

Sciences naturelles et médecine

– 3000 | – 2500 | – 2000 | – 1500 | – 1000

– 2800 Domestication du cheval
– 2600 Domestication du ver à soie
– 1700 Code d'Hammourabi
Traité de diagnostic en Mésopotamie – 1000

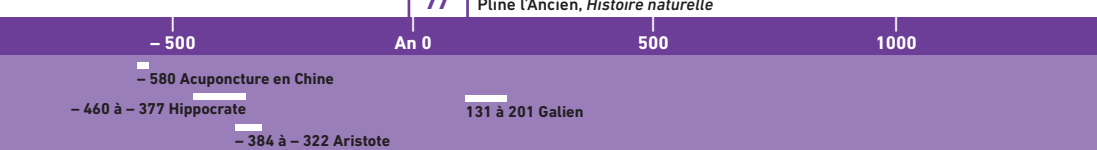
Mort pour la science

Le 24 août 79, le Vésuve entre en éruption près de Pompéi. Commandant de la flotte militaire, alors stationnée dans la baie de Naples, Pline se rapproche du volcan pour porter secours à la population en danger et observer l'éruption au plus près, preuve de sa curiosité naturaliste. Malheureusement, c'est là que Pline l'Ancien décède d'asphyxie, comme le rapporte son neveu Pline le Jeune.

Pierre Henri de Valenciennes, *Éruption du Vésuve avec la mort de Pline*, 1813.

Un inventaire à la romaine

Pline aborde dans son œuvre des matières très hétéroclites, s'inspirant pour cela des biographies des principaux médecins, astronomes et artistes de son époque. Il s'intéresse ainsi aux éclipses, aux singularités du flux menstruel, à l'histoire des horloges ou à celle de la mesure du temps. Le naturaliste parle aussi du cœur et des poumons, de la moelle épinière qui, d'après lui, devient un serpent après la mort. Ses descriptions zoologiques concernent le rhinocéros et l'hyène, mais encore le phénix et le sphinx. Ses textes renseignent également sur la culture de la vigne et sur les types de vin consommés par les Romains.



80 La boussole se cherche un inventeur

Wang Chong
27-vers 100

Les traces écrites ou matérielles concernant la boussole sont souvent difficiles à interpréter. Et pour cause, cet objet technique est le fruit de plusieurs inventions : usages d'aimants naturels, techniques de magnétisation et utilisation pour s'orienter sur terre comme en mer.

Quatre grandes inventions

Avec le papier, l'imprimerie et la poudre à canon, la boussole figure parmi les quatre grandes inventions aujourd'hui célébrées en Chine et attribuées à son ancienne civilisation. Le premier auteur chinois à mentionner l'attraction d'un petit objet de métal par l'aimant est le penseur Wang Chong, sous la dynastie des Han, vers 80 de notre ère dans *Balance des discours*. Désireux de réfuter les anciennes superstitions, il n'insiste cependant guère sur des usages plus anciens encore de cuillères taillées dans de la pierre d'aimant qui, indiquant le sud, étaient utilisées pour la divination et la géomancie.

Pour guider soldats et marins

L'utilisation de la boussole pour s'orienter semble beaucoup plus tardive. En 1044, dans les *Principes généraux des classiques de la guerre*, d'éminents fonctionnaires de la dynastie Song parlent de poudre noire, de trébuchet (► 597), mais aussi d'une aiguille en forme de poisson. Aimantée par chauffage puis refroidissement du métal, cette aiguille pouvait aider les armées à s'orienter dans l'obscurité.

Puis, dans les années 1080, d'après le spécialiste des techniques maritimes Zhu Yu, on se sert de la pierre d'aimant pour magnétiser l'aiguille de la boussole, qui devient alors d'usage courant chez les marins. Enfin, dans l'énorme ouvrage encyclopédique *Discussions de pinceau depuis un petit ruisseau de rêve*, Shen Kuo (1031-1095) montre que le nord magnétique ne se situe pas tout à fait au pôle Nord.

Entre l'Orient et l'Occident

Une question se pose alors. Est-ce bien cette invention chinoise qui arrive un siècle plus tard en Europe ? Vers 1190, dans *La Nature des choses*, l'auteur anglais Alexandre Neckam (1157-1217) parle en effet d'une manière explicite de la boussole comme d'un objet nouveau dont se servent les marins pour se diriger. Aucun document perse ou arabe ne permet toutefois d'attester d'un transfert de connaissance de la Chine vers l'Europe.

Une cuillère pour connaître l'avenir

On raconte qu'au tournant de notre ère, les Chinois se servaient des propriétés du magnétisme, et notamment de cuillères taillées dans un aimant naturel qu'on plaçait sur un tableau, pour prédire l'avenir. Ils utilisaient aussi de petites boussoles taillées en pierre d'aimant pour déterminer l'harmonie d'un lieu. Il ne semble pas que les boussoles aient servi à la navigation avant la fin du XIe siècle.

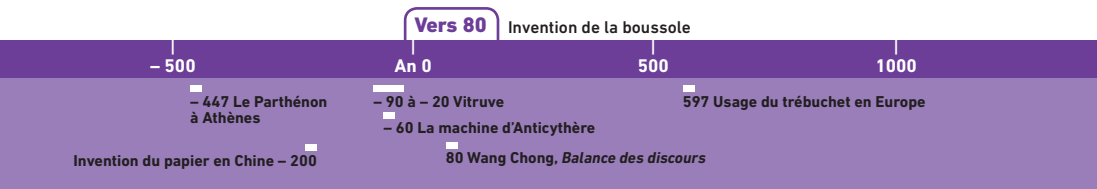
Reconstitution d'une cuillère indiquant le sud au temps des Han.

Une formule explosive

Tout comme pour la boussole, les évocations les plus anciennes faisant référence à la poudre à canon remonteraient à la dynastie des Han, vers 150 de notre ère. Toutefois, la première confirmation écrite date du VIIe siècle, autrement dit de la dynastie des Tang. Certains textes parlent alors d'une formule combinant du soufre, du salpêtre et une herbe appelée aristoloche. Les *Principes généraux des classiques de la guerre*, en 1044, expliquent comment fabriquer des grenades et des lance-flammes. Souvent utilisée pour fabriquer des feux d'artifice, la poudre permettra le développement des canons aussi bien en Chine qu'en Europe à partir du XIVe siècle.

« Une fine feuille de fer est taillée en forme de poisson [...]. Pour l'utiliser, on place une petite boîte remplie d'eau dans un espace sans vent et on dépose le poisson aussi plat que possible à la surface de l'eau, où il flottera, la tête pointant vers le sud. »

Zeng Gongliang, Ding Du et Yang Weide, *Principes généraux des classiques de la guerre*, 1044.



127 Ptolémée observe Saturne d'un nouvel œil

Claude Ptolémée
v. 100-v. 170

Le soir du 26 mars 127, à Alexandrie, Claude Ptolémée note la position de Saturne dans ses carnets. C'est la première observation connue de cet astronome dont le traité de mathématiques et d'astronomie, L'*Almageste*, restera une référence pendant plus de mille ans.

Des observations rigoureuses

On ne connaît presque rien de la vie de Claude Ptolémée. Mais son traité d'astronomie est l'un des plus importants de l'Antiquité. Son titre original en grec pourrait être traduit par *Synthèse mathématique*, mais il est plus connu comme L'*Almageste* ou « le grand livre », comme l'appelaient simplement les astronomes de langue arabe. Tout ce qu'on peut affirmer avec certitude, c'est que Ptolémée observe bel et bien la Lune et les planètes à plusieurs reprises du 26 mars 127 au 2 février 141 et qu'il combine ces données avec celles de ses prédécesseurs – comme Hipparque, Méton, et jusqu'aux astronomes babyloniens (► – 687) –, pour construire son modèle cosmique.

Un géocentrisme... excentrique

L'*Almageste* résume en 13 livres une théorie des mouvements apparents des astres, qui est aussi sophistiquée qu'efficace. Fidèle aux idées de son époque, Ptolémée considère que les astres se déplacent uniformément sur des cercles. Il fait cependant preuve d'une grande inventivité dans l'agencement de ces cercles pour rendre compte le mieux possible des observations précises dont il se sert. Dans sa théorie du Soleil, il suggère par exemple que la Terre n'est pas le centre exact de son mouvement, mais qu'elle est légèrement excentrée.

Inégalé pendant plus de mille ans

D'une grande technicité mathématique, l'*Almageste* reste l'œuvre la plus accomplie en astronomie durant près de 1 400 ans. Elle sera la base essentielle de toutes les tables de position des astres, calculées aussi bien par les astronomes de Bagdad au VII^e^ siècle que ceux de Tolède au X^e^ siècle ou encore de Paris au XIII^e^ siècle. Seul le livre de Copernic (► 1543, p. 112), qui place le Soleil au centre du monde, lui sera comparable de ce point de vue.

> *« Seule la mathématique, à condition de la pratiquer avec rigueur, offre à ses adeptes un savoir solide et indubitable, car les démonstrations s'y font par les voies indiscutables de l'arithmétique et de la géométrie. »*
>
> Ptolémée, L'*Almageste*, II^e^ siècle.

Mathématiques et astronomie

– 3000 | – 2500 | – 2000 | – 1500 | – 1000

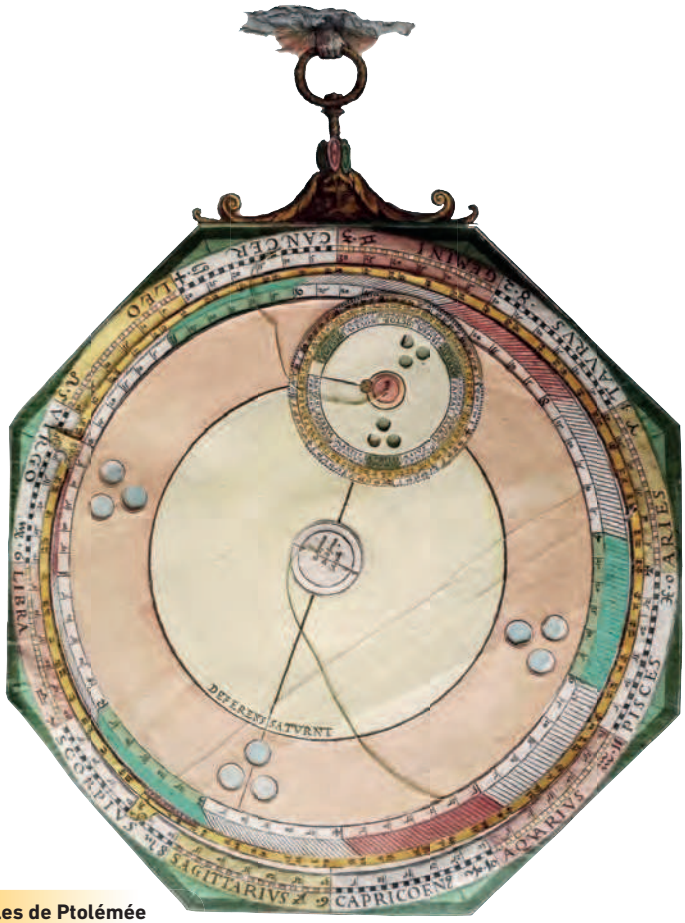
– 3100 à – 2800 Début de la construction de Stonehenge

– 3000 Tablettes comptables à Uruk

– 2000 Notation des nombres en base 60

Papyrus de Rhind, les mathématiques en Égypte – 1550

– 1400 Premiers catalogues d'étoiles en Mésopotamie



Les épicycles de Ptolémée

Du modèle de Ptolémée, on montre trop souvent des schémas simplistes. En réalité, c'est par un agencement complexe de cercles qu'il parvient à produire une représentation très précise des mouvements célestes. Le déplacement de Saturne autour de la Terre, sur un petit cercle « excentrique » tournant lui-même autour d'un point central proche de la Terre, est ici modélisé par le savant Petrus Apian.

Disque mobile expliquant les positions de la planète Saturne dans le zodiaque, extrait de *Astronomicum Caesareum* de Petrus Apian, 1540.

Une œuvre encyclopédique

Ptolémée semble avoir eu l'intention de construire une véritable encyclopédie de tous les savoirs de l'époque relevant des sciences mathématiques. L'*Almageste* n'est ainsi que le premier ouvrage dans lequel il cherche à compiler ce type de connaissances. En plus d'un grand traité d'astrologie et d'ouvrages d'astronomie pratique, il écrit un livre sur la musique, un autre sur l'optique et surtout une magistrale description du monde antique, *Géographie*, qui aura une très grande influence jusqu'aux voyages de découverte de la Renaissance (► 1154).

127 Première observation astronomique par Ptolémée

– 500 | An 0 | 500 | 1000

– 590 à – 495 Pythagore

– 625 à – 546 Thalès

– 300 Euclide, *Éléments*

v. – 287 à – 212 Archimède

150 Ptolémée (IIe siècle), L'*Almageste*

250 Diophante (v. 215-290), *Arithmétiques*

132 Zhang Heng convoque des dragons pour détecter les séismes

Zhang Heng
78-139

Un sismoscope à têtes de dragons est installé à la cour impériale de Luoyang en Chine. Ce serait le premier instrument à donner, à distance, la direction d'un séisme au moment où il se produit.

Une motivation politique et éthique

Entre 92 et 126, vingt-six séismes majeurs surviennent en Chine. L'empire des Han orientaux (25-220), constitué autour d'une société féodale bureaucratique, se doit d'apporter de l'aide aux populations et de diligenter des renforts aux autorités locales.

Mais comment réagir aux tremblements de terre dans les plus brefs délais et remédier efficacement aux troubles qu'ils engendrent ? La solution va venir d'une bien curieuse jarre, appelée « girouette des mouvements de la Terre », installée à la cour impériale en 132 par l'astronome Zhang Heng, à la demande de l'empereur Han Shundi.

Une girouette à huit têtes

Cerclé de huit têtes de dragons qui surplombent chacune un crapaud, l'étrange instrument est censé réagir aux secousses. Lors d'un séisme, la gueule de l'un des huit dragons doit s'ouvrir et laisser tomber une bille dans la bouche béante du crapaud situé en dessous, donnant ainsi la direction de l'épicentre. Les courtisans sont dubitatifs.

On raconte qu'en 138 (plus tardivement selon certains récits), une bille tombe. Personne n'a ressenti de secousse… Quelques jours plus tard, un messager arrive du Gansu, situé à plusieurs centaines de kilomètres de là, annonçant un séisme majeur. Le sismoscope a bien fonctionné, indiquant précisément la direction de la province chinoise touchée !

Une réussite technologique

Une telle prouesse en dit long sur l'ingéniosité de Zhang Heng – resté dans les mémoires comme astronome, mécanicien, cartographe et mathématicien – ainsi que sur le développement des sciences et techniques sous la dynastie Han. C'est durant cette période que se développent la métallurgie, les mécanismes hydrauliques, la pratique des forages et de distribution du gaz naturel, la fabrication du papier… et de nombreuses méthodes de résolutions de problèmes mathématiques.

Le mystère du sismoscope

Peu d'éléments nous sont parvenus sur le fonctionnement de cet instrument de deux mètres de diamètre. Toutefois, diverses équipes scientifiques ont réalisé des répliques du sismoscope en s'aidant de textes anciens. L'une des versions proposées est dotée d'un pendule central qui, lorsqu'il est ébranlé par une secousse, libère une bille unique. Celle-ci s'engage dans l'un des huit sillons et va actionner l'ouverture de la mâchoire du dragon qui correspond à la direction du séisme.

Reconstitution du sismoscope de Zhang Heng.

Le poids des superstitions

À l'époque des Han, les tremblements de terre sont interprétés comme des punitions divines condamnant les manquements du dirigeant dans sa mission de gouvernance. L'empereur Han Xuan (vers 70 av. notre ère) décrète ainsi des cérémonies « d'auto-incrimination » pendant lesquelles il promet d'être plus raisonnable dans la gestion des affaires de l'État. Un décret, entre 132 et 154, oblige même les hauts fonctionnaires à démissionner en cas de séisme. À cette même époque, des explications rationnelles sont pourtant avancées : les séismes seraient causés par un mouvement naturel de la Terre. Mais cela ne suffit pas à mettre fin à ces superstitions.

132 Détection de séismes à distance

– 500 | An 0 | 500 | 1000

– 447 Le Parthénon à Athènes

– 90 à – 20 Vitruve

– 60 La machine d'Anticythère

Invention du papier en Chine – 200

80 Wang Chong, *Balance des discours*

597 Usage du trébuchet en Europe

250

Un fabuleux bestiaire donne des leçons aux chrétiens

Conçu comme des leçons de théologie, un bestiaire anonyme, le *Physiologus*, détourne les connaissances naturalistes de l'époque et influence durablement la mentalité médiévale.

Le Physiologue a dit…

Le *Physiologus* est un bestiaire chrétien qui a connu une large diffusion pendant près de dix siècles. L'original grec semble avoir été écrit vers le IIIe siècle environ à Alexandrie, carrefour des traditions grecque et orientale. D'auteur anonyme, la plupart des notices qui le composent sont introduites par la formule « *le Physiologue a dit…* ».

Les différentes versions du bestiaire traduites en latin présentent une soixantaine d'animaux réels ou légendaires (hibou, griffon, serpent, licorne, etc.), sans ordre préétabli. Seul le lion ouvre systématiquement l'ouvrage.

Des leçons de théologie

Chaque notice du *Physiologus* comporte deux parties, un récit suivi d'une morale. La description symbolique des animaux et de la nature sert à introduire des leçons d'ordre théologique. Le lion est par exemple comparé au Christ, tout comme la panthère qui dégage un parfum envoûtant, attirant autour d'elle tous les autres animaux à l'exception du serpent, symbole du Diable.

Le bestiaire est commenté par les Pères de l'Église entre le IIIe et le VIIIe siècle. Parmi eux, saint Augustin (354-430) et saint Ambroise de Milan (340-397) reprennent des parties de l'ouvrage grec et soulignent l'importance de la connaissance du monde naturel dans l'interprétation de la Bible.

Vers des leçons de nature

D'un style simple et imagé, ce bestiaire semble destiné à un public peu instruit. Son objectif premier est d'adapter au christianisme les récits zoologiques des auteurs juifs et païens de l'Antiquité. Mais comme les ouvrages sur les animaux sont rares à l'époque, *Physiologus* a un impact considérable sur la mentalité et l'imaginaire médiévaux.

Il faudra attendre la fin du XIIIe siècle pour que les explications religieuses disparaissent peu à peu des bestiaires, laissant la place à un savoir de plus en plus descriptif, et que les traités d'histoire naturelle s'imposent (► 1241).

Le « roi des animaux »

Le lion, considéré comme le « roi » des animaux, est systématiquement décrit en premier dans les différentes versions du *Physiologus*. Il est comparé au Christ car il efface ses traces pour échapper aux chasseurs, tout comme le Seigneur, *le lion spirituel*, efface sa divinité en s'incarnant dans un corps humain. Le pélican, qui ouvre ses flancs pour nourrir ses poussins de son propre sang, est aussi une représentation du Christ.

Le roi des animaux, extrait du *Physiologus*.

L'émerveillement des bestiaires

Véritables albums iconographiques, les bestiaires du Moyen Âge compilent des représentations de bêtes sauvages auxquelles on associe des personnalités et des sentiments humains. Une bonne partie des animaux sont imaginaires, comme la licorne, le centaure (une tête et un torse humain sur un corps de cheval) ou le griffon (tête d'aigle sur corps de lion ailé). Les bestiaires ont un impact considérable dans la constitution de la mentalité médiévale et ont longuement inspiré la littérature, l'art et le cinéma. Dernièrement, des sagas cultes, comme *Harry Potter* ou *Les Animaux fantastiques*, se sont emparées de cet univers éblouissant.

« L'ensemble des créatures que Dieu plaça sur Terre, Dieu les créa pour l'homme, et afin que celui-ci prenne chez elles des exemples de croyance religieuse et de foi. »

Pierre de Beauvais, *Bestiaire*, XIII^e siècle.

250 Publication du bestiaire *Physiologus*

– 500 | An 0 | 500 | 1000

– 580 Acuponcture en Chine

– 460 à – 377 Hippocrate

– 384 à – 322 Aristote

77 Pline, *Histoire naturelle*

131 à 201 Galien

415 Assassinée, Hypatie devient immortelle

Hypatie d'Alexandrie
vers 370-415

À Alexandrie, une jeune femme enseigne les mathématiques et la philosophie. Par sa personnalité, son parcours et sa fin tragique, elle devient une figure emblématique du féminisme.

À bonne école

Théon d'Alexandrie est un mathématicien et un astronome reconnu. Il a commenté les œuvres des savants qui l'ont précédé, surtout celles d'Euclide (► – 300) et de Ptolémée (► 127). Sa fille Hypatie, elle-même philosophe, astronome et mathématicienne, l'a-t-elle aidé dans cette tâche, comme on l'affirme parfois ? Difficile à dire, même si on lui connaît un commentaire des *Arithmétiques* de Diophante (v. 215-290).

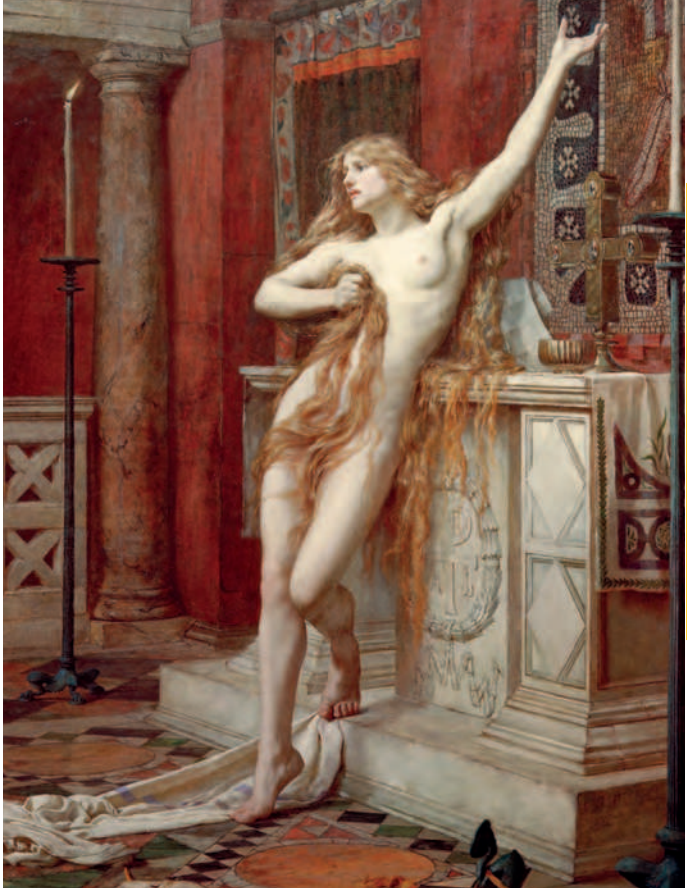
Hypatie est plutôt reconnue pour ses talents de pédagogue. À l'école néoplatonicienne d'Alexandrie, elle forme les enfants des bonnes familles de l'Empire romain d'Orient. Elle leur enseigne la philosophie de Platon (IVe siècle av. notre ère), l'usage d'instruments comme l'astrolabe, et les quatre disciplines du quadrivium : arithmétique, géométrie, astronomie et musique. L'un de ses élèves, Synésios de Cyrène, témoigne d'ailleurs dans ses lettres de sa profonde admiration pour celle qu'il désigne simplement comme « la philosophe ».

Martyre de la philosophie

Bien qu'elle n'exerce aucune fonction publique, Hypatie jouit d'une grande influence sur la vie civique d'Alexandrie. Mais voilà qu'en 412, un jeune évêque nommé Cyrille cherche à renforcer le pouvoir ecclésiastique au détriment des autorités impériales. Le préfet Oreste lui résiste et reçoit le soutien d'Hypatie.

Mal lui en prend. Si l'on en croit l'*Histoire ecclésiastique* laissée par Socrate le Scholastique, Hypatie est attaquée un jour de mars 415, sur les ordres de Cyrille, par un groupe de chrétiens fanatisés. Ces derniers la traînent dans une église et l'humilient publiquement avant de la mettre à mort et de brûler son corps.

C'est pourtant ce meurtre horrible qui lui assure l'immortalité. Pour les philosophes des Lumières, elle sera la victime emblématique du fanatisme chrétien destructeur du glorieux héritage de l'Antiquité. Plus récemment, auteurs et autrices féministes ont fait d'Hypatie une figure symbolique de l'emprise de la misogynie et de la façon dont celle-ci interdira aux femmes, des siècles durant, de pratiquer les sciences.



Hypatie, une figure inspirante

La philosophe et mathématicienne grecque est un sujet très prisé des artistes à travers les époques. On a fait d'elle le personnage principal de plusieurs films, de romans, de bandes dessinées… Même si elle avait déjà atteint un âge mûr au moment de sa mort, Hypatie est souvent représentée sous les traits d'une jeune vierge.

Charles William Michel, *Hypatia*, 1885.

« Heureuse Égypte ! là fleurit Hypatie, la sagesse et la grâce. Athènes, l'antique sanctuaire des hommes divins, n'est plus qu'un rendez-vous trivial et mercantile. »

Synésios de Cyrène, *Lettres de Synésius*, 395.

Le mystère de la bibliothèque d'Alexandrie

Dès le IIIe siècle avant notre ère, Alexandrie se dote d'institutions savantes et voit sa bibliothèque s'enrichir peu à peu d'un grand nombre d'ouvrages. Malheureusement aujourd'hui il n'en reste plus rien. Si la bibliothèque est encore en usage à l'époque romaine, il n'existe aucun témoignage précis des circonstances de sa disparition, ni des responsables de la destruction : Romains, chrétiens ou Arabes ? Une chose est sûre, le papyrus ne se conserve guère plus de deux ou trois cents ans sous un climat méditerranéen. Autre certitude : cette perte demeure le symbole, au même titre que la mort d'Hypatie, de l'oubli de l'héritage savant de l'Antiquité hellénistique.

415 Hypatie, femme de sciences

– 500 | An 0 | 500 | 1000

v. – 700 à – 800 Homère

– 587 à – 495 Pythagore

– 460 à – 370 Démocrite

– 428 à – 348 Platon

v. 54 Lucrèce, *De la nature des choses*

v. 500 Boèce, *De la musique*

636 Isidore de Séville, *Étymologies*

597

Une arme chinoise fait tomber Thessalonique

Contrairement à ce qu'on peut voir dans *Astérix*, les catapultes romaines n'utilisaient pas de mécanisme à bascule. Ce n'est qu'à la fin du VIe siècle de notre ère que cette arme, appelée trébuchet, arrive avec fracas en Occident.

Le trébuchet à point nommé

Capturé par le peuple turc des Avars au VIe siècle de notre ère, un soldat byzantin prénommé Bousas aurait, dit-on, racheté sa vie en leur enseignant comment construire une arme susceptible de prendre une cité. Peut-être s'agit-il du trébuchet à traction dont les Avars se servent lors du siège de Thessalonique, dans le nord de la Grèce actuelle, vers 597 ?

Dans le récit qu'il livre de cet événement, l'évêque Jean de Thessalonique donne en effet la première description connue en Europe de cette arme terrible qui, plus efficace que les anciennes catapultes à torsion, se répand rapidement en Occident.

> *« Suspendues à l'arrière de ces pièces de bois il y avait des frondes et à l'avant de solides cordes, au moyen desquelles, en tirant vers le bas et en libérant la fronde, ils propulsent les pierres vers le haut et avec un grand bruit. »*
>
> Jean de Thessalonique, *Les Miracles de saint Démétrius*, vers 680.

Dans les armées grecques et romaines de l'Antiquité, de gigantesques machines propulsaient de lourdes flèches ou des pierres à grande vitesse. Mais la force propulsive provenait habituellement de nerfs de bœuf qu'on étirait ou, pour plus d'efficacité, qu'on tordait vigoureusement. C'est en Chine, peut-être dès le IVe siècle avant notre ère, que des machines à bascule sont imaginées pour projeter de lourdes charges en direction de l'ennemi. On appelle ces machines, qui utilisent la force humaine, des trébuchets à traction.

Innovations sur tous les fronts

Adopté par les armées médiévales, le trébuchet est équipé à partir du XIIe siècle de lourds contrepoids qui augmentent encore sa puissance. Dès lors, pour y faire face, les villes et places européennes sont fortifiées au moyen de murs de plus en plus épais. Le savoir technique des spécialistes devient indispensable aux armées. Dans les chroniques de l'époque, un nouveau terme apparaît pour désigner les constructeurs de machines de guerre : l'*engigneor*, notre futur ingénieur.

À l'assaut !

De mai à août 1191, l'empereur germanique Henri VI donne le siège à Naples. Dans toutes les chroniques, on insiste sur les imposantes machines de guerre déployées à cette occasion. Sur ce dessin, tiré d'un manuscrit contemporain, on aperçoit des trébuchets à traction dont se servent les assiégeants.

Illustration extraite du *Liber ad honorem Augusti* de Petrus de Ebulo, 1195-1197.

Des mathématiques pour la guerre

Dès l'Antiquité, savants et ingénieurs contribuent à l'art de la guerre. Les catapultes à torsion sont décrites, par exemple, comme un problème de mécanique et de mathématiques par plusieurs ingénieurs dont Vitruve (► – 25). Dans l'un des traités de Philon de Byzance (IIIe siècle avant notre ère), le *Livre des machines de guerre*, on trouve une solution approximative du fameux « problème de la duplication du cube », c'est-à-dire de la façon de construire un cube dont le volume est le double d'un premier cube de référence. Ce problème n'a rien de l'amusement gratuit qu'on imagine souvent, puisqu'il s'agit, au contraire, de trouver le moyen de doubler la puissance d'une arme déjà redoutable.

636 Isidore de Séville sauvegarde l'héritage antique

Isidore de Séville
vers 560-636

Dans l'Hispanie wisigothique du VII^e siècle, à la demande du roi Sisebut, l'évêque Isidore de Séville rédige les *Étymologies*, une encyclopédie regroupant toute la connaissance de son époque. Ce sera l'œuvre la plus recopiée et la plus lue du Moyen Âge.

Au secours de la culture antique

À la fin du V^e siècle, l'Empire romain d'Occident n'existe plus. Les Francs, les Byzantins, les Ostrogoths, les Wisigoths et d'autres peuples venus du Nord-Est de l'Europe se partagent le territoire et s'affrontent les uns les autres. Quelques intellectuels prennent alors conscience que la culture classique s'efface des mémoires. Il est urgent de tirer parti des connaissances de l'Antiquité qui aident à mieux comprendre l'Écriture sainte (► 250). À l'instar de Boèce (vers 480-524), aristocrate romain qui traduit en latin les œuvres d'Aristote, de Platon et de Ptolémée (► 127), l'évêque Isidore de Séville se lance dans le sauvetage de l'héritage antique.

Une compilation sans préjugés

Pour rédiger les *Étymologies*, vers 636, Isidore puise dans sa vaste bibliothèque et compile les connaissances d'environ 150 sources. Il paraphrase Ovide, Cicéron, Pline, Cassiodore, Augustin… sans différencier les auteurs païens des chrétiens. Isidore ne souhaite pas innover. Il organise, rend accessible, préserve, transmet les connaissances profanes et sacrées dont il dispose et qui constituent l'inventaire du monde, le but du savoir étant de dissiper les croyances magiques.

Une approche par le mot

Dans les *Étymologies*, Isidore souligne que le sens profond des choses réside dans l'origine de leur nom, la proximité des sons faisant la proximité du sens. Ainsi, le monde a été appelé « monde » (*mundus*) parce qu'il est toujours en mouvement (*motus*), aucun repos n'ayant été accordé à ses éléments, et l'homme (*homo*) est ainsi appelé parce qu'il vient de la terre (*humus*).

Dans cet ouvrage, constitué de vingt livres, tous les sujets sont abordés. Isidore traite de questions de grammaire, de mathématiques, de l'être humain et de Dieu, des anges et des saints, du cosmos, de la Terre et ses parties, des pierres et métaux, des navires, bâtiments et vêtements, des marées, de l'Asie, des nombres infinis…

La diffusion des *Étymologies*

Les *Étymologies* sont abondamment recopiées et diffusées en Europe pendant plusieurs siècles, parfois annotées, complétées, illustrées ou enluminées comme le montre cette carte du monde ajoutée à une copie du XII^e siècle. Même après l'arrivée massive des textes d'Aristote traduits en arabe, elles sont encore très lues au XIII^e siècle et recopiées jusqu'au XVI^e.

Mappemonde extraite des *Étymologies* d'Isidore de Séville, XII^e siècle.

La tradition des encyclopédies

Initiée chez les Romains, la pratique encyclopédique consiste à regrouper et à compiler, dans un seul ouvrage de plusieurs volumes, l'ensemble des connaissances de l'époque. La grande encyclopédie romaine de Varron date du I^er siècle avant notre ère. Plus tard, Pline rédige sa célèbre *Histoire naturelle* sur le même modèle (► 77). Cette tradition perdure au Moyen Âge avec, outre les *Étymologies* d'Isidore de Séville, les textes de Boèce et ceux, allégoriques, de Martianus Capella (V^e siècle). La tradition encyclopédique, toujours vivante au XVIII^e siècle comme le montre l'entreprise de Diderot et d'Alembert (► 1751), se poursuit encore aujourd'hui avec notamment l'*Encyclopædia Universalis* et *Wikipedia* (► 2001).

– 500 | An 0 | 500 | 1000

v. – 700 à – 800 Homère
– 587 à – 495 Pythagore
– 460 à – 370 Démocrite
– 428 à – 348 Platon
v. 54 Lucrèce, *De la nature des choses*
v. 500 Boèce, *De la musique*

Les sciences et le temps

Les sciences naissent du besoin de connaître le temps. Et l'astronomie et les mathématiques viennent en partie du désir d'établir le calendrier. À côté de cette conception cyclique du temps, les philosophes s'interrogent sur le temps linéaire, entre un passé qui ne reviendra pas et un futur où nous ne serons plus. C'est le temps de l'histoire.

L'année, le mois, le jour

Aucune civilisation n'existe sans son calendrier. Son but principal est alors de fixer les cérémonies qui ponctuent l'année des agriculteurs. On sait ainsi d'avance quand auront lieu les labours, les semailles et les récoltes. Mais il est difficile d'accorder entre eux les cycles du jour et de la nuit, celui des saisons et celui des lunaisons. Combien y a-t-il de jours dans l'année ? De là viennent l'observation systématique et continue des astres, l'apparition des premiers instruments scientifiques (comme le gnomon) et le développement de techniques mathématiques sophistiquées. Les Babyloniens divisent en 360 degrés le cercle que parcourt le Soleil autour de la Terre en un an, afin que chaque jour corresponde à environ un degré. Toute l'astronomie n'existe que pour répondre à ce genre de questions.

Les philosophes et les horloges

« On mettrait plus facilement d'accord les philosophes que les horloges », écrit le philosophe latin Sénèque au I^er^ siècle de notre ère. Rien n'est moins sûr ! Pour Platon, le temps serait l'image mobile de l'éternité et pour Aristote, « le nombre du mouvement selon l'avant et l'après ». Si ces définitions restent assez obscures, cela n'empêche pas les artisans de l'Antiquité grecque et romaine d'user de la géométrie pour mettre au point des cadrans solaires de grande précision, qui fleuriront alors dans les lieux publics. La vie de tous les jours est bientôt rythmée par les douze heures qui séparent le lever du coucher du Soleil. Déjà, on divise ces heures en 60 minutes et ces minutes en 60 secondes…

Au service du pouvoir

Cette science du temps est l'affaire des puissants, qui trouvent là un moyen d'accroître leur contrôle sur leurs peuples et le cours des choses. Pendant longtemps, ils s'appuient sur la croyance que les astres peuvent influer les affaires humaines

(l'astrologie) et confèrent un prestige certain aux savants qui les conseillent. Admis aux affaires de l'État, les lettrés ainsi recrutés ne cesseront d'inventer de nouveaux moyens de se rendre utiles aux gouvernants : armes de guerre, remèdes contre les maladies, méthodes pour lever l'impôt et gouverner les empires, techniques de constructions civiles et militaires, etc.

Le cadran solaire de Carthage

Des cadrans solaires ornent souvent les espaces publics des cités antiques. Retrouvé dans les ruines de Carthage, le cadran ci-dessus laisse passer la lumière du Soleil par une ouverture circulaire et projette son image sur un réseau de lignes qui permet de déterminer l'heure du jour et le moment de l'année.

Cadran solaire exposé au musée du Louvre, Ier ou IIe siècle.

Chronographie

Ce sont aussi les savants de l'Antiquité qui inventent la chronologie. En Alexandrie, le bibliothécaire Ératosthène (► – 240) compile une célèbre *Chronographie* de toute l'histoire grecque, depuis la chute de Troie jusqu'à la mort d'Alexandre le Grand. C'est une autre conception du temps mathématique qui se déploie ici : un temps orienté du passé vers l'avenir, où, ici et là, surnagent des événements marquants qui arrivent à des moments opportuns (que les Grecs appellent *kairos*). Sans ce cadre conceptuel, une chronologie des sciences et des techniques telle que nous la publions aujourd'hui serait tout simplement impossible.

Les savoirs médicaux en Europe

La médecine comme système de savoirs et profession voit le jour avec l'apparition des premières civilisations du Proche-Orient, en Inde et en Chine. Dans le cadre européen, la médecine galénique-hippocratique devient le système de référence principal jusqu'au XIX^e siècle.

Hippocrate, « père » de la médecine

Dans la culture grecque se développe d'abord une médecine ancrée dans le sacré, où songes et divination jouent des rôles importants. Puis au V^e siècle, un système basé sur la raison et la philosophie naturelle s'impose. Les connaissances médicales s'articulent alors autour du *Corpus hippocraticum*, un ensemble de textes attribués à la figure semi-mythique d'Hippocrate (► – 450). La médecine hippocratique se distingue par son caractère logique et discursif. Contrairement aux répertoires mésopotamiens et égyptiens de diagnostics et de remèdes, elle cherche à expliquer les processus vitaux par l'analogie et les principes qui agissent dans le monde naturel. L'exercice de la médecine est alors un métier libéral, dont l'objet n'est pas la connaissance de la maladie même, mais plutôt le patient.

Galien, dans le sillage d'Hippocrate

Dans le cadre hippocratique, l'auteur médical le plus influent de l'Antiquité est Claude Galien (env. 131-201), un médecin grec au service des empereurs romains. Son œuvre est particulièrement volumineuse, les éditions modernes répertoriant 150 traités et comptant plus de 20 000 pages imprimées. Pourtant, seulement un quart de l'œuvre de Galien aurait été conservée dans sa langue originale grecque. Véritable encyclopédie des connaissances médicales de l'Antiquité, elle propose une vision rationnelle du fonctionnement du corps humain dans un univers ordonné et soumis à des lois naturelles. On trouve des conceptions très similaires dans la médecine traditionnelle chinoise et indienne.

La santé, une question d'humeurs

Selon la médecine hippocratique et galénique, la santé correspond à un état d'équilibre entre les humeurs (*chymoi*) du corps. Ainsi, l'objectif de la médecine est de préserver cet équilibre ou de le restaurer quand apparaît la maladie. Les interventions

doivent être douces et agir sur le mode de vie : on préconise un régime adéquat d'exercice, de repos, d'hygiène, de pratiques sexuelles et de diète. On ne fait appel aux drogues et à la chirurgie qu'en dernier recours. L'environnement joue aussi un rôle central dans l'apparition de la maladie : le climat, les émanations de la terre – appelées « miasmes » – ou certains métiers peuvent induire des troubles. Ces théories médicales seront à la base de la pratique médicale en Occident jusqu'au XIX^e siècle.

Les quatre humeurs

Selon la médecine hippocratique et galénique, le corps humain est composé de quatre humeurs (le sang, la bile jaune, la bile noire et le phlegme), qui correspondent à quatre tempéraments (sanguin, colérique, mélancolique et flegmatique). Sur cette figure qui date du début de la Renaissance – signe de la grande pérennité de ces idées –, une correspondance est aussi établie avec les deux sexes, les quatre saisons, représentées par les signes du zodiaque, et les quatre éléments (l'air, le feu, la terre et l'eau).

Leonhard Thurneysser, *Quinta essentia*, 1574.

Premières traces de la médecine

Les plus anciens textes médicaux conservés sont des tablettes akkadiennes de la bibliothèque d'Assourbanipal (VII^e siècle avant notre ère). Elles renferment souvent des listes de diagnostics médicaux et de remèdes fabriqués à partir de centaines de substances minérales et végétales. Le code d'Hammourabi (env. 1700 av. notre ère), pour sa part, mentionne l'existence de professionnels de la santé et spécifie les tarifs applicables pour différents traitements ainsi que les châtiments autorisés en cas de mauvaises pratiques.

« Voici ce qu'il en est de la maladie dite sacrée [épilepsie] : elle ne me paraît avoir rien de plus divin ni de plus sacré que les autres, mais la nature et la source en sont les mêmes que pour les autres maladies. Sans doute c'est grâce à l'inexpérience et au merveilleux qu'on en a regardé la nature et la cause comme quelque chose de divin. »

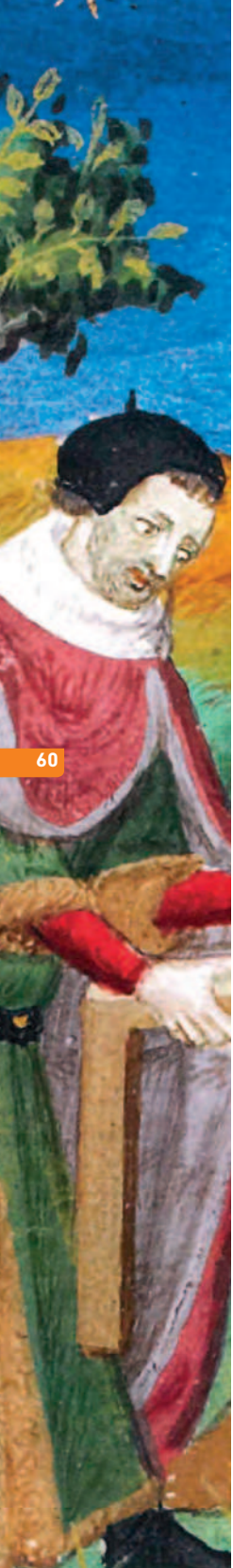
Hippocrate, *De la maladie sacrée*.

Des savoirs qu'on s'échange

700–1500

L'expression « Moyen Âge » est postérieure à la période elle-même, les médiévaux n'ayant bien sûr pas conscience de vivre une période intermédiaire entre l'Antiquité et la Renaissance. Mais ils n'ignorent nullement l'importance de la médiation des savoirs. Ils insistent notamment sur la transmission des connaissances anciennes même si celles-ci, pour une bonne part, semblent perdues. Ils accordent également de la valeur à la communication entre grandes civilisations : la chrétienté, l'islam, jusqu'à l'Orient mystérieux, la Chine et l'Inde. À cette époque, les grands centres du savoir sont avant tout des lieux d'échange.

Astronomes et géomètres au travail, vers 1420.



Des savoirs qu'on s'échange

700–1500

La légende noire

Pour beaucoup, le Moyen Âge rime avec obscurantisme. Rien n'est plus faux ! Certes, les auteurs païens perdent de leur autorité face à la religion chrétienne qui s'impose tout autour du bassin méditerranéen. En Occident, l'Empire romain s'éteint en 476. À Athènes, l'Académie est fermée en 529. Et, dans les monastères, on arrête parfois de copier certains textes. Mais c'est oublier l'œuvre des savants de l'Antiquité tardive, comme Boèce (480-524), qui lèguent en héritage de nombreuses traductions latines, ou Isidore de Séville, qui réalise une encyclopédie de grande renommée (► 636).

En Orient, c'est Byzance !

Ailleurs, du Japon à l'Inde et à la Perse, en passant par la Chine, la chute de l'Empire romain n'a pas le même impact : les échanges commerciaux et intellectuels se poursuivent. À Byzance, on préserve les traditions de l'Antiquité et on innove avec bonheur. Au VII^e^ siècle, les premiers hôpitaux y comptent déjà des centaines de lits et sont d'importants centres d'enseignement médical. Au siècle suivant, l'empire islamique reprend le flambeau et dispute l'hégémonie culturelle à Byzance. Dès 760, le calife al-Mansur (714-775) ordonne la collecte de manuscrits grecs, perses, syriaques et sanskrits. Dans la Maison de la sagesse de Bagdad (► 833), on compile et on traduit les auteurs anciens, mais on cherche aussi à faire avancer le savoir. Au nord de l'Europe, Charlemagne et son conseiller Alcuin comprennent l'importance de cultiver le savoir pour gouverner un vaste empire.

Sur les frontières, de féconds échanges

Par la suite, c'est souvent près des frontières entre civilisations, dans des lieux d'échanges interculturels, que prospèrent les sciences. Autour de l'an mil, un pape qui connaît bien l'Espagne musulmane introduit ainsi les chiffres arabes dans l'Europe chrétienne (► 999). Entre le Maroc et l'Espagne, Averroès assemble une grande encyclopédie médicale (► 1166). En Sicile et au sud de l'Italie, les armées chrétiennes s'appuient parfois sur les connaissances géographiques de savants arabes (► 1154). À Tolède, en Espagne, aux XII^e^ et XIII^e^ siècles, des savants chrétiens, juifs et musulmans collaborent à la production d'un vaste corpus scientifique.

Le souffle du renouveau

Jusqu'au milieu du XIV^e^ siècle, l'Europe occidentale prospère sous l'effet de progrès techniques en agriculture et dans l'industrie textile ou mécanique. Le fleurissement de l'architecture gothique en est un témoignage visible (► 1230), comme l'horlogerie (► 1368). À Paris, Bologne ou Oxford, maîtres et étudiants forment des universités qui jouissent d'une large autonomie (► 1277). Même les ravages de la Grande Peste autour de 1350 ne suffiront pas à étouffer le souffle du renouveau. Le XV^e^ siècle est déjà, en Italie, celui de la Renaissance, tandis qu'en Allemagne un artisan invente une technique qui bouleversera la circulation des savoirs : l'imprimerie (► 1448).

833
Invention de l'algèbre

700 800 900 1000 1100

800-814 Charlemagne, empereur d'Occident

Première croisade 1096-1099

813-833 Al-Mamun, calife à Bagdad

999
Diffusion des chiffres arabes en Occident

1021
Nouvelle vision de l'optique d'Alhazen

1154
Cartes et planisphère du monde

1166
Averroès, *Colliget*

1230
Le carnet
de Villard de Honnecourt

1241
Premier traité
de fauconnerie

1368
Premiers écrits
sur l'horlogerie

1482
Innovations
de Léonard de Vinci

1200 1300 1400 1500

1180-1230 Premières universités en Europe

1347-1352 Épidémie de peste noire en Europe

1337-1453 Guerre de Cent Ans

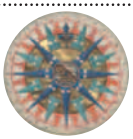
1279-1294 Kubilay khan, empereur de Chine

Prise de Constantinople par les Ottomans 1453

Christophe Colomb met pied en Amérique 1492

1158
Hildegarde,
phytothérapeute

1269
Théorie du magnétisme
de Pierre de Maricourt



1277
L'université de Paris
discute les idées d'Aristote

1280
Calendrier
de l'empereur
Kubilay khan

1304
Traité d'optique
sur l'arc-en-ciel

1417
Redécouverte
de Lucrèce
par le Pogge

1448
Premier atelier
d'imprimerie

833

Al-Khwarizmi invente l'algèbre

Al-Khwarizmi
vers 780-
vers 850

La parution entre 813 et 833 de l'*Abrégé de calcul* d'al-Khwarizmi marque la naissance d'une nouvelle discipline dont le rôle deviendra central dans le développement des mathématiques : l'algèbre.

Aux sources de l'algèbre

À Bagdad, capitale d'un vaste empire qui s'étend de l'Inde à l'Espagne, la plus ancienne des Maisons de la sagesse s'ouvre aux savants en 832, sous le règne du calife al-Mamun. Astronomes, mathématiciens, penseurs, lettrés et traducteurs la fréquentent.

Parmi eux se trouve le mathématicien et astronome al-Khwarizmi, qui publie au plus tard en 833, son *Abrégé du calcul par la restauration et la comparaison*. Le savant n'a, *a priori*, aucune prétention à innover et pourtant son ouvrage marque la naissance d'une discipline mathématique, avec ses objets et ses outils propres : l'algèbre.

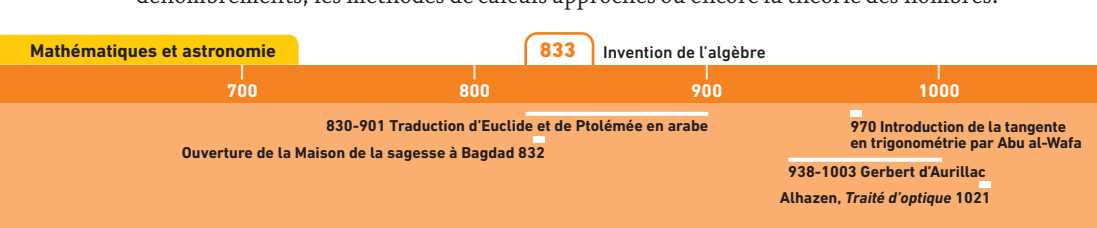
Un premier manuel pratique

Al-Khwarizmi souhaite fournir une méthode qui aide à traiter tous les problèmes que les hommes rencontrent dans leurs échanges commerciaux, le calcul de leurs héritages, l'arpentage des terres, etc. Il commence donc par définir les nombres (entiers et rationnels positifs), l'inconnue et le carré de l'inconnue. Puis il élabore une méthode permettant de résoudre les équations du premier et second degré.

Dans son ouvrage, où les calculs sont décrits par des phrases, le savant propose au total six catégories d'équations, et fournit un algorithme de résolution pour chacune d'entre elles. Ces algorithmes – le mot dérive du nom même d'al-Khwarizmi sont établis par un raisonnement géométrique à la manière des Grecs, sans pourtant qu'il soit fait mention des *Éléments* d'Euclide (► – 300).

L'algèbre en héritage

L'œuvre d'al-Khwarizmi, qui touche l'astronomie et la géographie, lui vaut un statut scientifique et social puissant. Le texte est lu dans tout l'empire musulman. Pour beaucoup, l'algèbre d'al-Khwarizmi apparaît cependant comme inachevée et de nouveaux courants de recherches poursuivent les travaux engagés. L'algèbre conduit à une importante généralisation et restructuration de l'héritage mathématique grec, mais donne aussi naissance à de nombreux domaines mathématiques comme les dénombrements, les méthodes de calculs approchés ou encore la théorie des nombres.



Bagdad, la ville ronde

Pour amorcer la construction de Bagdad, le deuxième calife abbasside, Abu Jafar al-Mansur, engage les astronomes et les artisans les plus renommés de tout l'empire abbasside. Construite en quatre ans, entre 767 et 771 de notre ère, par 100 000 ouvriers venus de tout le califat, la nouvelle capitale devient une plaque tournante du commerce international et s'impose dans les domaines de la science et de la culture.

Reproduction de la ville ronde de Bagdad.

Des maisons de la sagesse

La Maison de la sagesse de Bagdad connaît au IXe siècle un développement sans précédent. Elle comporte une bibliothèque, mais aussi un centre de traduction et un centre de réunions. Les savants (particulièrement les astronomes) en sont les principaux utilisateurs. Sous le gouvernement d'al-Mamun, le mouvement de recherche et de traduction des textes grecs en arabe s'accentue. La société musulmane s'estime alors principale héritière de la science antique.

999

Un pape est inspiré par les chiffres arabes

Gerbert d'Aurillac
vers 938-1003

Gerbert d'Aurillac, jeune moine français et futur pape, invente un nouvel outil de calcul qui facilite les quatre opérations. Ce dernier utilise le système de numération arabe (le nôtre aujourd'hui) qui apparaît ainsi pour la première fois en Occident latin.

Le casse-tête des chiffres romains

Jusqu'au Xe siècle, en Occident latin, on ne connaît que les chiffres romains. Cette écriture des nombres à l'aide des symboles I, V, X, L, C, D ou M rend complexes les calculs de la vie courante. Pour se faciliter la tâche, les évêques, seigneurs ou marchands utilisent alors ce que l'on appelle un abaque, c'est-à-dire une planche divisée en colonnes dans lesquelles on déplace des jetons blancs. Outil pratique pour l'addition et la soustraction, l'abaque l'est bien moins pour la multiplication et la division.

Les chiffres arabes à la rescousse

C'est alors que Gerbert d'Aurillac, moine d'origine modeste, va modifier cette table à calcul. Parti étudier en Catalogne dans les monastères de Ripoll puis de Vic, il s'initie là-bas aux mathématiques arabes et découvre les méthodes de calcul couramment utilisées par les Arabes d'Espagne.

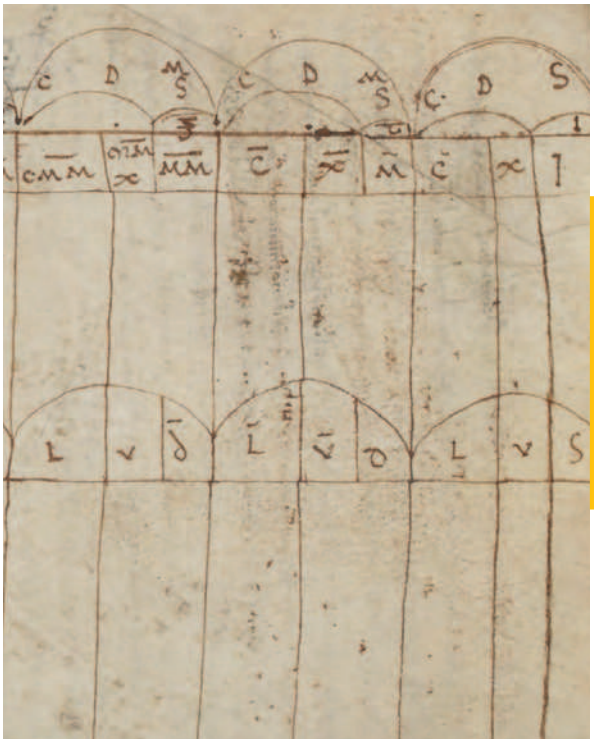
Rapprochant ces méthodes des méthodes latines, il invente un nouvel abaque avec des jetons chiffrés. La multiplication en est grandement facilitée ainsi que la division. Sur les jetons sont représentés, pour la première fois en Occident latin, les symboles des chiffres « arabes ».

Une lente diffusion…

Lorsque Gerbert devient le pape Sylvestre II, en 999, sa nouvelle méthode de calcul est enseignée dans quelques écoles de monastères. Mais elle y reste confinée. Les marchands européens devront attendre pour en bénéficier !

En 1202 paraît le *Livre du calcul* écrit par Leonardo Fibonacci, dit Léonard de Pise (1175-1240), fils de commerçant qui a étudié les mathématiques arabes lors de ses voyages. Son ouvrage, écrit en pisan, défend l'utilité des chiffres indo-arabes face à la numération romaine. Il obtient un franc succès auprès des marchands mais les textes officiels refusent l'usage de ces chiffres.

Ce n'est finalement qu'au XVIIe siècle que l'usage de la numération arabe, augmentée du zéro, se répand dans toute l'Europe et s'impose avec l'intensification du commerce.



L'abaque de Gerbert, mode d'emploi

L'abaque est une surface comportant vingt-sept colonnes, la colonne de droite pour les unités, la suivante pour les dizaines, etc. Les jetons y sont placés pour représenter le nombre, une place vide signifiant « zéro ».

Dessin de l'abaque de Gerbert, manuscrit du XI^e siècle.

Des chiffres indiens aux chiffres arabes

La numération qui est la nôtre est née en Inde vers le début de notre ère. Elle comporte alors neuf chiffres. Lors des calculs, ces derniers sont dessinés dans la poussière, du bout du doigt. Un espace vide figure l'absence de valeur. Le zéro, ce *quelque chose* qui signifie *rien*, arrive plus tard, à partir de 458. C'est ensuite vers 825, à Bagdad, qu'un traité de calcul écrit par al-Khwarizmi (► 833) fait apparaître les chiffres indiens en Occident. Ces derniers, peu à peu déformés par les Arabes occidentaux vers la graphie *ghubar*, vont alors être repris, notamment sur les jetons de l'abaque de Gerbert d'Aurillac. Cette graphie continuera d'évoluer en Occident jusqu'au XV^e siècle.

Les chiffres arabes

Les jetons de l'abaque sont gravés des neuf chiffres arabes. Cette graphie occidentale, dite *ghubar*, est alors couramment utilisée par les arabes d'Andalousie autour de l'an mil. Copiée et recopiée, elle va évoluer au cours des textes.

Neuf graphies appartenant au Codex Vigilanus, 976.

1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500

Fibonacci, *Livre de calcul* 1202 — 1230 Sacrobosco, *La Sphère* — 1344 Tentative de réforme du calendrier julien

Approximation de π par al-Kashi 1424

Premières éditions imprimées d'Euclide à Venise 1482

1021

Alhazen offre une nouvelle vision de l'optique

Al-Hasan Ibn al-Haytham
965-1039

Au Caire, un savant s'appuie sur une démarche expérimentale pour unifier deux visions de l'optique, géométrique et physique. Il est reconnu aujourd'hui comme un pionnier de la méthode expérimentale et surtout comme le père de l'optique moderne.

Pas si fou !

Né à Bassora en Irak, le savant al-Hasan Ibn al-Haytham, plus connu sous le nom d'Alhazen, rejoint Le Caire en 1011 à la demande du calife pour tenter, semble-t-il, de réguler les eaux du Nil. Réalisant qu'il est impossible de maîtriser les inondations de ce fleuve grâce à un barrage, il feint la folie pour échapper à la colère du calife. Ce dernier l'assigne alors à résidence, au Caire.

Dès lors, Alhazen met son temps à profit pour écrire de nombreux traités de mathématiques et d'astronomie. Son œuvre est si prolifique qu'on le surnomme le « second Ptolémée », en référence au grand astronome qui vivait à Alexandrie au IIe siècle (► 127). Il doit avant tout sa renommée à son *Traité d'optique* qu'il achèvera en 1021, année de sa réhabilitation et de la mort du calife.

Et la lumière fut !

> *« Nous nous donnerons pour but [...] l'usage de la justice et non la poursuite de nos goûts, nous attachant à [...] la recherche de la vérité et non au penchant pour les opinions. Peut-être cette voie nous conduira-t-elle au vrai. »*
>
> Alhazen, *Traité d'optique*, 1021.

Le principal objectif de ce traité en sept livres est de faire le pont entre l'optique géométrique d'Euclide (► – 300) et de Claude Ptolémée et les travaux de philosophie naturelle menés sur la vision par des savants comme Aristote (384-322 av. notre ère).

Alors que les Anciens imaginent que les rayons lumineux sont émis par l'œil, Alhazen affirme qu'ils sont reflétés par n'importe quel objet dans toutes directions et absorbés par l'œil. Il démontre, par plusieurs expériences, que la lumière se propage de façon rectiligne et établit les lois de la réflexion.

Dans sa quête incessante de vérité, moyen pour lui de se rapprocher de Dieu, il est l'un des premiers scientifiques à énoncer les étapes de la démarche expérimentale pour vérifier des théories. Traduite en latin avant 1230, et notamment reprise par Roger Bacon, Johannes Kepler et René Descartes, l'œuvre d'Alhazen aura un impact profond en Europe.

Jeu de miroirs

L'optique est une science mathématique et physique qui induit de nombreuses applications. Dès l'Antiquité, on raconte ainsi qu'Archimède (287-212 av. notre ère) aurait incendié les navires qui assiégeaient la ville de Syracuse, en Sicile, grâce à des miroirs ardents. Toute cette iconographie se retrouve sur l'édition latine des œuvres d'Alhazen.

Frontispice de l'édition latine de Bâle du *Traité d'optique* d'Alhazen, 1572.

Quand l'optique y voit plus clair

Dès le IVe siècle avant notre ère, Aristote cherche à expliquer la vision dans ses *Météorologiques*, en supposant qu'elle est causée par des rayons émis par l'œil. Les savants plus enclins aux mathématiques, comme Euclide et Ptolémée, développent, quant à eux, une théorie de la perspective faite de théorèmes géométriques. Peu intéressés par la cause des phénomènes optiques, ils cherchent à déduire les lois de la réflexion et de la réfraction à partir d'un petit nombre d'axiomes. Alhazen réunit ces deux visions en intégrant la description physiologique de l'œil à l'optique géométrique.

1154

Un géographe dessine le monde pour le roi de Sicile

Al-Idrisi
vers 1100-entre 1165 et 1186

Le roi normand de Sicile, Roger II, demande au géographe arabe al-Idrisi de concevoir une carte de tous les continents, toutes les mers et toutes les villes connus. La mappemonde, issue de ce travail encyclopédique, sera l'une des meilleures du monde médiéval.

Les cartes du pouvoir

Connaître le terrain et l'adversaire, de Calabre et d'Apulie, voilà ce dont a besoin le redoutable guerrier et roi de Sicile, Roger II (vers 1095-1154). Pour mener sa politique agressive d'expansion en Méditerranée, il se doit d'en connaître précisément les contours et les peuples.

En 1139, profitant de quelques années de trêve, il consolide son pouvoir et fonde un État bureaucratique et centralisé. La cartographie s'inscrit dans ce projet de contrôle. Il demande alors au savant géographe arabe qui réside à sa cour, al-Idrisi, de réaliser un planisphère en argent avec la position de tous les continents, de toutes les mers, villes et voies de communication.

Une exploration méthodique du monde

Pour réaliser ce planisphère, al-Idrisi dispose de l'abondante littérature de l'époque, qui s'est largement développée à partir de la *Géographie* de Claude Ptolémée (► 127). Il y ajoute les notes de ses nombreux voyages, qui l'ont mené jusqu'en Asie Mineure, au Maghreb ou en Andalousie, et celles de ses enquêteurs qui arpentent l'Europe en notant leurs observations géographiques, économiques et ethnologiques. Al-Idrisi mettra dix-huit ans à regrouper les données et trois ans à rédiger l'ensemble de son œuvre, de 1154 à 1157.

Une géographie de haute précision

Si al-Idrisi garde l'esprit de la cartographie de Ptolémée, il gagne en précision. En plus d'une mappemonde, il découpe le monde en 7 « climats » et 10 sections longitudinales, soit au total soixante-dix cartes régionales juxtaposables apportant des détails de géographie physique, humaine et économique sans pareil. L'ensemble est accompagné d'un traité de géographie intitulé *Divertissement pour celui qui désire parcourir le monde*. Bien que le nom d'al-Idrisi soit rarement cité par ses successeurs arabes, son œuvre bénéficie d'une longue postérité. Il est le premier cartographe arabe traduit en Occident à la Renaissance.

Le monde à l'envers

Comme les cartes arabes sont orientées au sud, il faut lire cette mappemonde à l'envers. Peu de détails y figurent. C'est dans le traité et les soixante-dix cartes régionales qui l'accompagnent que sont consignées les nombreuses informations récoltées par al-Idrisi. Quelque cinq mille fleuves, localités et montagnes, du Danemark à la Chine, y sont décrits.

Carte du monde d'al-Idrisi plaçant le Sud en haut, XII^e siècle.

La *Géographie* de Ptolémée

Cette œuvre grecque de Ptolémée représente le monde tel qu'on le connaissait au II^e siècle. Elle regroupe des données astronomiques permettant de positionner précisément les sites, mais également des observations directes de nombreux savants, voyageurs ou enquêteurs. Les routes et les royaumes y sont décrits, ce qui ajoute à l'aspect érudit du travail un rôle utilitaire pour le déplacement des armées et la levée des impôts. La *Géographie* est composée de huit tomes dont le dernier rassemble, dans sa version complète, un ensemble de soixante-dix cartes .

1154 Cartes et planisphère du monde

1100 — 1200 — 1300 — 1400 — 1500

Averroès commente Aristote 1169

1200 L'université à Paris

1277 Censure à l'université de Paris

1321 Mort de Dante

1427 Découverte des Açores par des navigateurs portugais

Dénonciation de l'astrologie par Jean Pic de La Mirandole 1496

1158

Une sainte célèbre la pharmacie du Bon Dieu

Hildegarde de Bingen
1098-1179

En Allemagne, une religieuse bénédictine associe la tradition médicale gréco-latine et la pharmacopée populaire. C'est la première phytothérapeute moderne. Ses deux ouvrages médicaux constituent une véritable encyclopédie de sciences naturelles et de médecine.

Une femme visionnaire

Fondatrice de son propre couvent, Hildegarde de Bingen termine le *Scivias*, son premier ouvrage décrivant ses visions mystiques, en 1151. Ses dons de voyance et de guérisseuse en font l'une des femmes les plus renommées de son temps. À la même époque, l'abbesse allemande entreprend la composition d'un traité pratique de la nature et de la santé, sorte d'encyclopédie médicale, qui se diffuse sous la forme de deux livres distincts, *Physica* et *Causae et Curae*.

Pour un corps et un esprit sains

Causae et curae est l'un des principaux traités médicaux écrits en Occident au Moyen Âge. Pour Hildegarde, la santé et la maladie, physique et spirituelle, sont la conséquence de l'équilibre ou du déséquilibre des liquides, ou humeurs, qui composent et vivifient l'organisme (► dossier, p.56-57). D'après sa conception, l'homme et l'Univers, œuvres d'un même créateur, sont intimement liés l'un à l'autre. Ainsi, si l'Univers participe aux maux des hommes, il doit aussi prendre part à leur guérison.

Hildegarde insiste sur l'hygiène, une bonne alimentation, suffisamment de repos et d'exercice. Elle est le seul auteur du Moyen Âge à transmettre par écrit les pratiques de guérison d'une « sage-femme » et à comprendre que pour soigner il faut s'occuper de la personne en totalité.

Dans la pharmacie du Bon Dieu

Dicté entre 1151 et 1158, *Physica* a la forme d'un recueil d'histoire naturelle dans lequel 513 plantes, animaux et minéraux sont décrits en vertu de leur utilité pour la santé et le bien-être. Pour l'âme en souffrance, la seule guérison possible est la rencontre avec Dieu, mais les symptômes des maladies et les douleurs corporelles peuvent être soulagés grâce aux dons de la création. Car la nature offre tout ce dont les hommes ont besoin pour retrouver l'équilibre perdu, notamment les plantes. Et dans son œuvre, la religieuse fait une compilation des connaissances empiriques des propriétés curatives de la flore du centre de l'Europe.

Des remèdes qui ont la forme

Employées à toutes les époques et à travers toutes les cultures, les plantes sauvages constituent une véritable pharmacie naturelle. D'après la pensée populaire, c'est leur forme ou la forme de leurs parties – fleur, fruit ou autre – qui renseigne sur l'effet bénéfique de leur utilisation. Au Moyen Âge, les plantes thérapeutiques sont appelées « simples » (*simplicis herbae*), un terme qui regroupe également certains remèdes d'origine animale ou minérale.

Illustration extraite du *Livre des simples médecines* de Matthaeus Platearius, XII^e siècle.

« La Terre, avec ses plantes utiles, offre un panorama des fonctions spirituelles de l'Homme. »

Hildegarde de Bingen, *Physica*, Préface, 1151-1158.

1158 Hildegarde, phytothérapeute

1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500

1098-1179 Hildegarde de Bingen

1166 Averroès, le *Colliget*

1220 Création de la faculté de médecine de Montpellier

1345-1352 Pandémie de peste noire en Asie, puis en Europe

1166

Averroès achève son encyclopédie médicale

Abu al-Walid Ibn Rushd, dit Averroès
1126-1198

Le juriste, philosophe, astronome et médecin Ibn Rushd, connu en occident sous le nom d'Averroès, compile le savoir médical du monde musulman. Traduit un siècle plus tard en latin sous le titre de *Colliget*, son travail devient une référence pour la médecine de la Renaissance.

Au service du sultan

Né dans une prestigieuse famille de cadis (juges) à Cordoue, et disciple du philosophe et médecin al-Turjali, Averroès est appelé à Marrakech par Abd al-Mumin, premier sultan de la dynastie Almohade, pour réformer la cour de justice. En travaillant à côté d'Avenzoar (1091-1161), médecin du sultan, Averroès élabore un recueil de médecine qui accompagne le traité sur les maladies (*Kitab al-taisir*) rédigé par son collègue.

Un médecin émérite

La première version de l'ouvrage d'Averroès, le *Kitab al-kulliyat* ou *Principes généraux de la médecine*, est écrite entre 1161 et 1166. Elle est originale par son caractère encyclopédique et systématique, qui prend modèle sur le travail du botaniste et pharmacologue Ibn Wafid (997-1074). Basé sur une approche logique de l'art médical, l'ouvrage est composé de sept livres qui traitent respectivement de l'anatomie, la santé, la maladie, les symptômes, les drogues et aliments, l'hygiène et la thérapeutique.

> *« La médecine possède en effet un aspect théorique, qui appartient à la science naturelle, et un aspect pratique. [...] Mais ce que nous comprenons par voie expérimentale est peu de chose en comparaison de ce qui est nécessaire. Ainsi la voie du raisonnement est-elle nécessaire pour expliquer les causes de ce que nous enseigne l'art médical expérimental. »*
>
> Averroès, *Colliget*, livre I, 1166.

Un philosophe en disgrâce

En 1194, Averroès produit une seconde version du *Kitab al-kulliyat*, qui renforce son approche théorique. Toutefois, ses commentaires sur la philosophie d'Aristote, qu'il utilise pour interpréter des doctrines théologiques, attirent l'animosité des oulémas (autorités religieuses). Il est alors chassé de la cour du sultan et ses livres philosophiques sont brûlés publiquement. Seuls ses travaux médicaux et astronomiques seront sauvés.

Le *Colliget*

Le *Colliget* est une édition commune des ouvrages d'Avenzoar (*Kitab al-taisir*) et d'Averroès (*Kitab al-kulliyat*). Traduit pour la première fois en hébreu et en latin en 1285 par le médecin Tobia Bonacosa, il sera imprimé à Venise en 1482. Dès lors, il devient un ouvrage essentiel de l'enseignement universitaire de médecine en Europe, jusqu'au XVII^e^ siècle.

Extrait du *Colliget*, 1530.

Médecine et philosophie

Basé sur le *Canon de médecine* d'Ibn Sina (980-1037), connu en Occident sous le nom d'Avicenne, le *Colliget* privilégie une approche théorique de la médecine. Pour Averroès, la médecine doit être basée sur des principes, car seule la raison peut accéder aux lois universelles. Cette conception est proche de celle abordée dans le plus connu de ses traités de droit, la *Bidaya*. Ainsi, tel un juge, le médecin doit baser son diagnostic sur le *tahmin* (hypothèse) et le *hads* (intuition), et utiliser l'observation ou l'interrogation pour confirmer ses propositions.

1166 Averroès, *Colliget*

1100 1200 1300 1400 1500

1098-1179 Hildegarde de Bingen

1220 Création de la faculté de médecine de Montpellier

1345-1352 Pandémie de peste noire en Asie, puis en Europe

1230

Villard de Honnecourt croque avec passion les cathédrales

Villard de Honnecourt
début du XIIIe siècle

Un homme du XIIIe siècle parcourt les chantiers d'Europe et note ce qu'il voit dans un carnet qui nous renseigne sur les techniques des bâtisseurs de cathédrales. Ses croquis sont d'une grande précision, à une époque où la géométrie est encore confidentielle.

Un mystérieux auteur

Un énigmatique carnet de croquis, composé de trente-trois feuillets de parchemins cousus sous une peau grossière, est conservé à la Bibliothèque nationale de France. Sur les premières pages, l'auteur a inscrit son nom : Villard de Honnecourt. Il semble donc être originaire de cette petite commune du Nord de la France, Honnecourt. Mais on ne sait à peu près rien d'autre sur lui, si ce n'est qu'il a parcouru l'Europe. De Cambrai, Meaux, Reims, Laon et Chartres, mais aussi de Bavière, Suisse et Hongrie, il rapporte de nombreuses esquisses de personnages bibliques ou contemporains, des représentations d'animaux, des dessins architecturaux et des schémas de machines.

Des esquisses fantastiques

La précision des schémas, la qualité des esquisses et l'exactitude des plans sont remarquables. Certains dessins renseignent sur la coupe des pierres, d'autres donnent les plans d'engin de levage ou décrivent le maniement d'outils (règle, équerre, compas…). D'autres encore indiquent comment utiliser certains tracés géométriques, à la manière d'un « guide pratique ».

On trouve enfin quelques dessins de machines et d'inventions que Villard a observées ou conçues lui-même : le trébuchet, utilisé pour détruire des murs ou lancer des projectiles (► 597), une machine à mouvement perpétuel, et même un pigeon automate. Tout l'univers fascinant des techniques médiévales.

Le temps des cathédrales

Villard était-il un simple compagnon du voyage ou plutôt un grand architecte dirigeant les chantiers de construction des cathédrales ? Difficile à dire, mais les plans dessinés dans son carnet permettent de situer son activité au premier tiers du XIIIe siècle, autrement dit à l'apogée du gothique et au « siècle des cathédrales ». Ils apportent ainsi aux historiens de précieux éléments sur les connaissances et les techniques qui ont permis d'ériger, parfois en peu de temps, ces impressionnants édifices.

Innovations techniques

700 — 800 — 900 — 1000

720 Invention d'une horloge mécanique par Liang Lingzan

Fabrique de papier à Bagdad 794

Publication de la recette de la poudre à canon 1044

L'art de la géométrie

Au Moyen Âge, on enseigne peu la géométrie d'Euclide dont le texte des *Éléments* (► – 300) est assez mal connu. Cependant, ingénieurs, arpenteurs et architectes perpétuent un savoir pratique ancien concernant la géométrie qui fera l'objet de plusieurs traités spécialisés. Villard de Honnecourt dit lui-même que « l'art de la géométrie » peut aider à mieux dessiner. C'est finalement au début du XIII^e^ siècle que des traductions latines des *Éléments* apparaissent et que les artisans commencent à s'y référer.

Tour de l'horloge de la cathédrale de Laon, extrait du carnet de Villard de Honnecourt, XIII^e^ siècle.

« Villard de Honnecourt vous salue et prie tous ceux qui travailleront sur les machines qu'on trouvera dans ce livre de prier pour son âme et de se souvenir de lui. »

Villard de Honnecourt, Carnet, XIII^e^ siècle.

1241

L'empereur Frédéric II consacre la fauconnerie

Frédéric II
1194-1250

Le traité de Frédéric II sur l'art de chasser des oiseaux en vol est le plus célèbre du Moyen Âge, tant par son caractère encyclopédique, abondant en descriptions faites à partir d'observations de la nature, que par la richesse de ses illustrations.

Une cour cosmopolite et inspirante

Surnommé Stupor Mundi (la Stupeur du monde) à cause d'une personnalité hors du commun, Frédéric II de Hohenstaufen est un personnage en avance sur son époque. En lutte avec la papauté, il est excommunié deux fois. Ouvert à toutes les cultures, il entretient un vaste réseau de correspondants aussi bien chrétiens que juifs et arabes.

À la façon des princes de la Renaissance, il anime une cour fréquentée par des poètes, médecins et astrologues : un véritable foyer des arts et des sciences. Le mathématicien Leonardo Fibonacci (1175-1240), grand défenseur de l'utilité des chiffres indo-arabes (► 999), figure parmi ses invités, mais aussi le philosophe Michael Scot (vers 1175-1235), qui lui fait découvrir l'œuvre d'Aristote (384-322 av. notre ère) et en particulier l'*Histoire des animaux*.

Le temps de l'envol

Nourri par ces rencontres, Frédéric II écrit *De arte venandi cum avibus* ou *De l'art de chasser avec les oiseaux*. Dans ce texte fondateur, son expérience personnelle s'appuie sur sa connaissance livresque de la fauconnerie et lui permet d'élaborer une synthèse complète du sujet abordé.

Outre les techniques de chasse et d'affaitage, l'auteur décrit le comportement et la morphologie des rapaces et de leurs proies ailées. Textes et images composent un véritable manuel d'ornithologie qui passe en revue la forme des becs, les couleurs des plumes ou les silhouettes en vol de nombreuses espèces d'oiseaux.

Un homme d'observations

L'œuvre de Frédéric II témoigne de l'émergence, au Moyen Âge, d'une activité créatrice basée sur l'étude directe de la nature. Cette nouvelle approche entraîne la remise en question d'une bonne partie des idées héritées des traditions gréco-latines et arabes, jusque-là non contestées. Grâce à ses observations, Frédéric II réfute de fausses croyances reçues d'Aristote comme celle concernant l'hibernation des hirondelles dans les anfractuosités des rochers pendant la saison froide.

La fauconnerie, un art multiculturel

Originaire des steppes asiatiques, la fauconnerie se répand à travers l'Europe à partir du Ve siècle grâce aux peuples germaniques. Elle se perfectionne avec des pratiques d'origine orientale, comme l'usage du chaperon et du leurre, et atteint son apogée au Moyen Âge. Encore pratiquée dans de nombreux pays, et inscrite au patrimoine culturel immatériel de l'humanité de l'UNESCO en 2010, la fauconnerie trouve un emploi civil dans les aéroports, où les rapaces sont dressés pour éloigner les oiseaux des pistes.

Fauconnier extrait du traité de Frédéric II, *De arte venandi cum avibus*, XIIIe siècle.

L'éveil des sciences naturelles

Au début du XIIIe siècle, l'œuvre d'Aristote commence à être connue. De nombreux Occidentaux traduisent ainsi directement ces textes anciens et enrichissent leur contenu grâce aux observations faites dans la nature. C'est le cas de Frédéric II mais aussi d'Albert le Grand (vers 1200-1280), professeur à l'université de Paris. Dans son œuvre *De animalibus*, il démonte également de vieilles croyances, comme celle du phénix renaissant de ses cendres. Il se lance dans la description du milieu naturel qui l'entoure et fait les premiers portraits des animaux du centre de l'Europe. Pour certains, comme la taupe, il pratique des dissections.

Premier traité de fauconnerie **1241**

1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500

1098-1179 Hildegarde de Bingen

1166 Averroès, le *Colliget*

1220 Création de la faculté de médecine de Montpellier

1345-1352 Pandémie de peste noire en Asie, puis en Europe

1269

Pierre de Maricourt est attiré par l'aimant

Pierre Pèlerin de Maricourt
XIIIe siècle

Dans un traité sur la pierre aimantée, Pierre de Maricourt développe la première théorie du magnétisme basée sur l'expérience.

Lettre au soldat Siger

Le 8 août 1269, la ville de Lucera, dans le Sud de l'Italie, est assiégée par des croisés envoyés par le pape Clément IV (fin XIIe-1268) qui veut en chasser les musulmans. Dans le camp des croisés, un homme achève de rédiger une lettre sur l'aimant qu'il destine à un soldat nommé Siger de Foucaucourt.

On connaît peu de choses sur l'auteur de cette lettre qu'on appelle Pierre Pèlerin et qui pourrait être originaire de Maricourt, actuellement dans la Somme. Peut-être fait-il partie des ingénieurs à l'origine de ces fantastiques machines d'assaut qui permirent aux croisés d'écraser la ville (► 597).

Un traité magnétique

Dans sa lettre, qui est un véritable traité sur l'aimant, Pierre de Maricourt tente d'expliquer les propriétés d'aimantation de ces pierres, décrites dès l'Antiquité par Pline l'Ancien (► 77). Il fait alors l'hypothèse d'une force magnétique qui pénétrerait à l'intérieur de l'aimant et propose, pour le démontrer, une expérience simple qui consiste à observer le comportement d'un aimant coupé en deux. Dès cette époque, le savant d'Oxford Roger Bacon (v. 1220-1292) y voit les prémices d'une science expérimentale.

Pierre établit, *via* ses expériences, qu'un aimant possède deux pôles, le nord et le sud, qui sont liés aux pôles magnétiques de la Terre, et qu'une aiguille de fer aimantée s'oriente suivant ces deux pôles. Il avance également que les pôles opposés s'attirent alors que les pôles semblables se repoussent.

Au service du mouvement perpétuel

La seconde partie du traité de Pierre de Maricourt, souvent moins valorisée, mérite néanmoins d'attirer l'attention car elle présente des utilisations pratiques de l'aimant. L'auteur y propose par exemple deux constructions possibles de la boussole, et les plans d'une roue qui, selon lui, pourrait tourner indéfiniment grâce aux propriétés des aimants. Déjà à l'époque, la possibilité d'une machine à mouvement perpétuel fait rêver bien des savants.

Mathématiques et astronomie

700 | 800 | 900 | 1000

830-901 Traduction d'Euclide et de Ptolémée en arabe

Ouverture de la Maison de la sagesse à Bagdad 832

970 Introduction de la tangente en trigonométrie par Abu al-Wafa

938-1003 Gerbert d'Aurillac

Alhazen, *Traité d'optique* 1021

L'invention de la boussole

Difficile de déterminer l'origine de la boussole avec précision (▸ 80). En 1044, on retrouve la description d'une aiguille en forme de poisson servant à s'orienter par rapport aux points cardinaux. Puis au début du XII^e siècle, Zhu Xi (vers 1130-1200), célèbre penseur de la dynastie Song dont le père est surintendant du port de Guangzhou, décrit une boussole marine. Elle se compose, à l'origine, d'une simple aiguille aimantée flottant dans un récipient d'eau. Puis l'aiguille est placée sur un pivot, dans une boîte, à laquelle on adjoint une rose des vents au XVI^e siècle.

Enluminure extraite des *Premières Œuvres* de Jacques de Vaulx, 1583.

« Cette pierre porte en elle-même une ressemblance avec le ciel. [...] Comme dans le ciel il y a deux points plus remarquables que les autres, par le fait que la sphère céleste tourne autour d'eux dont l'un est appelé pôle Nord et l'autre pôle Sud, ainsi distingues-tu parfaitement, dans cette pierre, deux points, l'un nord, l'autre sud. »

Pierre de Maricourt, lettre sur l'aimant, 1269.

Théorie du magnétisme de Pierre de Maricourt **1269**

1100 — 1200 — 1300 — 1400 — 1500

Fibonacci, *Livre de calcul* 1202 — **1230 Sacrobosco, *La Sphère*** — **1344 Tentative de réforme du calendrier julien**

Approximation de π par al-Kashi 1424

Premières éditions imprimées d'Euclide à Venise 1482

1277

L'évêque de Paris croise le fer avec l'université de Paris

En 1277, l'évêque de Paris, Étienne Tempier, interdit la diffusion de 219 thèses enseignées par les maîtres de l'université de Paris ou échangées entre étudiants. Il les juge contraires au dogme chrétien.

L'université prend des libertés

À la fin du XI^e siècle, le nombre d'écoles, libres ou épiscopales, augmente dans les grandes villes. Elles attirent, par la réputation de leurs maîtres, des élèves au-delà des frontières régionales. Vers 1150 les maîtres parisiens se regroupent et forment la première « université » de France. Elle bénéficie, en 1200, de sa propre juridiction. Elle se compose alors de la faculté des Arts qui enseigne les arts libéraux (disciplines préliminaires à toute formation intellectuelle), des facultés de droit, de médecine et de théologie, la plus prestigieuse.

Les textes gréco-arabes, abondamment diffusés depuis quelques décennies dans tout l'Occident latin, entrent peu à peu dans les programmes de la faculté des Arts. Or, certains textes de la philosophie naturelle d'Aristote (384-322 av. notre ère) décrivent un monde éternel mû par un principe abstrait, ce qui va à l'encontre de la révélation biblique d'un monde créé par Dieu et limité dans le temps. À plusieurs reprises, des condamnations de l'Église tentent d'interdire l'enseignement de ces textes. Sans effet.

219 thèses censurées

Mandaté par le pape, l'évêque de Paris Étienne Tempier envoie ses émissaires enquêter dans le monde universitaire parisien pour, enfin, connaître les promoteurs de certains propos allant à l'encontre de la morale et du dogme chrétiens. Peu de temps lui suffit pour émettre, le 7 mars 1277, un acte de censure à l'encontre de 219 thèses. Quiconque les diffusera sera excommunié.

Dès lors, il est interdit de dire que « la première cause ne peut pas créer plusieurs mondes », thèse limitant la puissance de Dieu, ou de soutenir que « les philosophes sont les seuls sages du monde », qualité revendiquée par les théologiens. Outre ces interdictions, la condamnation cherche à prévenir les relâchements moraux que le monde universitaire est susceptible de propager.

Certains enseignements sont suspendus pendant quelques années. Puis de nouveaux courants de pensée apparaissent au XIV^e siècle, séparant philosophie et théologie. Les thèses dissonantes posent dès lors bien moins de problèmes.

Aristote sur les bancs de la faculté

Les anciens programmes (grammaire, rhétorique, dialectique et arithmétique, géométrie, astronomie, musique) sont profondément modifiés au XIIIe siècle. Le nouveau statut de 1255, dont se dote l'université de Paris, place de façon officielle, à côté d'un peu de grammaire et de logique, la connaissance de l'ensemble des œuvres connues d'Aristote. L'enseignement est pratiqué par lectures et surtout par questions disputées entre des « répondants » et des « opposants ».

Université médiévale de Bologne peinte par Laurentius de Voltolina, 1350.

Séparer foi et pensée rationnelle

L'université, créée dans un contexte de développement urbain, se démarque des pratiques contemplatives des monastères. Malgré les condamnations répétées de l'Église visant à définir les conditions d'usage des textes d'Aristote, se développe en son sein une nouvelle tradition philosophique dans laquelle on conçoit une histoire du monde fondée, non plus sur le dogme chrétien, mais sur des principes premiers naturels. La cohabitation de la foi chrétienne avec cette envie de connaître le monde par usage de la seule raison est difficile. Mais ces tensions vont être étudiées et assouplies, laissant la créativité savante du XIVe siècle s'exprimer librement.

Censure à l'université de Paris **1277**

1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500

Averroès commente Aristote 1169

1200 L'université à Paris

1321 Mort de Dante

1427 Découverte des Açores par des navigateurs portugais

Dénonciation de l'astrologie par Jean Pic de La Mirandole 1496

1280

L'empereur de Chine accorde les saisons

Kubilay khan
vers 1215-1294

Fondateur de la dynastie Yuan, l'empereur Kubilay khan décide de réformer entièrement le système astronomique qui sert à prédire les phénomènes célestes, comme les éclipses. Il s'agit du plus grand projet scientifique de l'époque.

L'astronomie, un art sacré

L'une des spécificités de l'astronomie chinoise est son caractère bureaucratique, reflet de son statut officiel, même si la pratique privée de l'astronomie, alors interdite, n'est pas toujours sanctionnée. Les empereurs de Chine insistent en effet sur l'origine divine de leur pouvoir et démontrent l'efficacité de leur médiation céleste en octroyant à leur peuple un calendrier précis. C'est ainsi que pendant deux mille ans, plus de cinquante systèmes astronomiques se succèdent afin de calculer les mouvements des corps célestes et de prédire les éclipses.

Une réforme ambitieuse

Remanié en 1280 sous les ordres du célèbre empereur mongol Kubilay khan, le calendrier devient le *Shou shi li* ou « système astronomique accordant les saisons », selon la traduction proposée par l'historien des sciences Nathan Sivin (né en 1931). Promulgué l'année suivante, on estime que c'est le plus précis de tous les systèmes astronomiques chinois.

Et pour cause, ce nouveau calendrier est l'œuvre de toute une équipe de spécialistes dont les principales figures sont Wang Xun (1235-1281) et Guo Shoujing (1231-1316). La commission chargée de la réforme de 1280 et de la production d'almanachs compte ainsi jusqu'à 77 fonctionnaires de haut rang, 44 étudiants et de nombreux subalternes.

Un observatoire à Pékin

Afin d'établir un système astronomique capable de produire des prédictions fiables, les chercheurs font de nombreuses observations nouvelles. Pendant trois ans, on relève les coordonnées d'une centaine de planètes et d'étoiles. Pour cela, les scientifiques transportent leur équipement dans vingt-sept lieux différents, couvrant environ 6 000 km dans la direction nord-sud et 3 300 km dans la direction est-ouest. On érige même à Pékin un véritable observatoire dont le toit est équipé d'« instruments ingénieux », comme la sphère armillaire.

Une sphère d'influence

D'après les sources existantes, la nature des instruments utilisés par la commission de 1280 est ambiguë et les historiens émettent diverses hypothèses à leur propos. De son côté, Nathan Sivin est convaincu que l'« instrument ingénieux » vanté par les contemporains de Kubilay khan est une sphère armillaire qui représente les diverses sphères célestes, et servira de modèle à celle conçue par l'astronome Guo Shoujing.

Sphère armillaire, observatoire de la montagne Pourpre (Chine), XV^e^ siècle.

Marco Polo à la cour de Kubilay

Le célèbre Vénitien Marco Polo rencontre l'empereur Kubilay khan en 1274 et passera près de vingt ans à sa cour. *Le Devisement du monde*, dans lequel il raconte son voyage en ancien français, paraît en 1298 et deviendra un best-seller médiéval. C'est à travers lui que l'Occident découvre la richesse de la civilisation chinoise. Le livre a un impact majeur sur la cartographie médiévale et sur la motivation de Christophe Colomb à entreprendre un voyage vers la Chine en 1492, sans se douter que l'Amérique lui barrera la route entre la côte espagnole et l'Asie.

Calendrier de l'empereur Kubilay khan **1280**

1100 — 1200 — 1300 — 1400 — 1500

Fibonacci, *Livre de calcul* 1202 — **1230 Sacrobosco, *La Sphère*** — **1344 Tentative de réforme du calendrier julien**

Approximation de π par al-Kashi 1424

Premières éditions imprimées d'Euclide à Venise 1482

1304

L'arc-en-ciel se révèle dans une goutte d'eau

Thierry de Freiberg
vers 1240-apr. 1311

En voulant mettre en ordre ses réflexions sur l'arc-en-ciel, un dominicain rédige l'un des plus importants traités d'optique du Moyen Âge… malheureusement oublié jusqu'au XIXe siècle !

Le siècle de l'arc-en-ciel

Les savants sont nombreux, au XIIIe siècle, à s'intéresser à l'arc-en-ciel. N'est-ce pas le symbole que Dieu envoie à Noé après le Déluge pour sceller son alliance avec les êtres humains ? Puisque Dieu est lumière, l'optique rencontre ainsi la théologie et la philosophie, et s'affirme comme le moyen privilégié de comprendre le monde et parfois même d'éclairer les dogmes chrétiens (► 1277).

En 1272, Roger Bacon (vers 1220-1292), qui vient de réaliser des expériences sur l'arc-en-ciel et enseigne à Paris, voit arriver un jeune étudiant allemand, Thierry de Freiberg. Ce dominicain, qui deviendra maître de théologie, s'intéresse lui aussi à l'expérimentation et décide, sous l'impulsion du directeur des dominicains de Toulouse, de mettre de l'ordre dans ses propres réflexions sur l'arc-en-ciel. En 1304, il rédige le traité *De l'arc-en-ciel et des impressions créées par les rayons* [*lumineux*], en s'appuyant sur des expériences.

Les couleurs transparaissent

À l'aide d'une sphère en verre remplie d'eau, Freiberg simule ainsi une grosse goutte d'eau. Sous un certain angle bien précis, lorsque le soleil brille, il voit alors apparaître quatre couleurs. Il a réussi à reproduire un arc-en-ciel ! Mieux encore, il décrit le trajet des rayons lumineux au travers de la sphère, expliquant la formation des couleurs de l'arc-en-ciel.

> *« Un rayon entre dans le corps transparent, le traverse jusqu'à la face opposée, de là il se trouve réfléchi intérieurement vers la première face par laquelle il était entré et ensuite il émerge vers l'œil. »*
>
> Thierry de Freiberg, *De l'arc-en-ciel*, 1304.

À la même époque, le savant persan Kamal al-Din al-Farisi (1267-1319) propose une explication similaire de l'arc-en-ciel. Mais les travaux des deux hommes tombent dans l'oubli. Et les savants qui s'intéressent à la question au XVIIe siècle, comme Descartes (► 1633) et Newton (► 1687), les ignorent complètement. Ce n'est qu'au XIXe siècle que leurs démonstrations seront réhabilitées.

Mathématiques et astronomie

700 | 800 | 900 | 1000

830-901 Traduction d'Euclide et de Ptolémée en arabe

Ouverture de la Maison de la sagesse à Bagdad 832

970 Introduction de la tangente en trigonométrie par Abu al-Wafa

938-1003 Gerbert d'Aurillac

Alhazen, *Traité d'optique* 1021

Sur la piste de l'arc-en-ciel

Dans ses *Météorologiques*, Aristote (384-322 av. notre ère) souligne que l'arc-en-ciel n'est qu'une apparence due aux effets de la lumière et de l'eau. Il faudra attendre les travaux d'Alhazen pour expliquer géométriquement la réfraction de la lumière (► 1021) puis ceux de Robert Grosseteste (vers 1175-1253) pour rendre compte de la formation des arcs-en-ciel. Son disciple, Roger Bacon, se servira d'un astrolabe pour mesurer la hauteur de l'arc dans le ciel et montrer qu'il est fonction de la position du Soleil.

Barthélemy l'Anglais, *Une leçon sur l'arc-en-ciel*, fin du XIVe siècle.

Roger Bacon, savant d'expérience

Personne mieux que Roger Bacon ne représente le véritable esprit scientifique qui règne au XIIIe siècle dans les universités de Paris et d'Oxford. Né en Angleterre vers 1220, il étudie à Oxford avant d'enseigner à Paris. Grand lecteur d'Aristote et d'Alhazen (► 1021), Bacon produit une œuvre philosophique et scientifique très ample, notamment dans les domaines de l'astronomie, de l'alchimie et de l'optique, et promeut la méthode expérimentale. Toutefois, son œuvre n'aura pas le même succès auprès de ses contemporains que celles d'autres théologiens, comme Albert le Grand, Thomas d'Aquin ou Bonaventure.

Traité d'optique sur l'arc-en-ciel **1304**

1100 — 1200 — 1300 — 1400 — 1500

Fibonacci, *Livre de calcul* 1202 — 1230 Sacrobosco, *La Sphère* — 1344 Tentative de réforme du calendrier julien

Approximation de π par al-Kashi 1424

Premières éditions imprimées d'Euclide à Venise 1482

1368

L'horloge mécanique se dévoile avec poésie

Jean Froissart
vers 1337-apr. 1404

Dans le poème l'*Orologe amoureus* rédigé en moyen français, le chroniqueur Jean Froissart compare l'amant à une horloge. Sa description de la mécanique amoureuse est aussi l'un des premiers écrits sur l'horlogerie.

L'amant et l'horloge

Célèbre chroniqueur de la guerre de Cent Ans, Jean Froissart est aussi un poète qui se passionne pour l'amour chevaleresque. Rien d'étonnant alors qu'il s'inspire de l'horloge du palais royal de l'île de la Cité, à Paris, pour écrire un poème de 1174 vers intitulé l'*Orologe amoureus* ou *L'Horloge amoureux* – au masculin dans le texte car le mot vient d'être inventé. Au fil des vers, il compare ainsi le comportement de l'amant au mécanisme de l'horloge. Et certains passages, copiés à l'encre rouge dans le manuscrit, lui donnent le caractère d'un véritable traité d'horlogerie.

Au cœur de la mécanique

Dans son poème, rédigé vers 1368, Froissart parle notamment du « foliot » : un balancier qui permet d'assurer la régularité de la rotation d'une roue dentée, qui peut entraîner les aiguilles d'un cadran. Grâce à cette innovation, l'horloge devient assez régulière pour actionner des cloches ou un cadran, et marquer fidèlement le temps.

Le développement des horloges mécaniques – succédant aux cadrans solaires et aux clepsydres – est justement rendu possible à la fin du XIII^e^ siècle grâce à cette innovation technique cruciale dont il est difficile de retracer l'origine avec précision.

Aux origines de l'horlogerie

Bien que certains distinguent des pendules sur les carnets de Villard de Honnecourt (► 1230), les premières horloges attestées datent du début du XIV^e^ siècle. Dès 1327, l'abbé anglais Richard de Wallingford (1292-1336), puis l'ingénieur padouan Giovanni Dondi (1318-1389) décrivent les horloges délicates qu'ils construisent. Mais leurs écrits circulent peu.

Le poème chevaleresque de Jean Froissart – possiblement inspiré d'un traité d'horlogerie anonyme de la deuxième moitié du XIV^e^ siècle – est de son côté plus largement diffusé et donc beaucoup mieux connu. L'invention de l'horloge n'a peut-être pas changé la conception de l'amour, mais elle aura un impact profond sur celle du temps.

Innovations techniques

700 | 800 | 900 | 1000

720 Invention d'une horloge mécanique par Liang Lingzan

Fabrique de papier à Bagdad 794

Publication de la recette de la poudre à canon 1044

L'heure de la cité

Construite par l'horloger allemand Henri de Vic entre 1362 et 1370, et installée sur le palais royal de l'île de la Cité de Paris à la demande du roi Charles V, l'horloge de la Conciergerie devient immédiatement célèbre. À l'origine, l'horloge ne comporte pas de cadran, les heures étant simplement marquées par la sonnerie d'une cloche. Un cadran y est ajouté en 1418 et, depuis le XVIe siècle, des inscriptions latines y célèbrent le pouvoir royal, enjoignant les spectateurs à respecter sa loi.

L'horloge de la Conciergerie à Paris.

« Une seconde roue est ajoutée qui la retarde [l'horloge] et la fait mouvoir par ordonnance et par mesure, par la vertu du foliot aussi qui continuellement la meut ainsi, un coup à droite et l'autre à gauche. »

Jean Froissart, *L'Horloge amoureux*, 1368.

Dieu horloger

L'introduction de l'horloge mécanique en Europe a des conséquences majeures sur l'appréhension même du temps. Autrefois pensé comme cyclique, variable selon les saisons et rythmé par les révolutions des planètes, le temps devient linéaire et conventionnel. Cela change la manière dont on paie les ouvriers, mais aussi la vision savante du monde. En 1737, le roi Frédéric II de Prusse, développant une pensée cartésienne, écrit à Voltaire que Dieu lui-même est horloger, ce dernier ayant créé les ressorts cachés qui font se mouvoir les êtres humains et le monde tout entier. À son tour Frédéric use de la même allégorie que Jean Froissart ! Et les savants de l'époque moderne embrassent cette image mécaniste du monde.

Premiers écrits sur l'horlogerie **1368**

1100 — 1200 — 1300 — 1400 — 1500

1180 Arrivée des moulins à vent en France

1194 Début de la construction de la cathédrale de Chartres

1285 Invention des lunettes de correction

1364 Horloge astronomique à Padoue

1448 Invention de l'imprimerie par Gutenberg

1417

À l'aube de la Renaissance, le Pogge redécouvre Lucrèce

Poggio Bracciolini
1380-1459

Dans une abbaye allemande, un passionné de manuscrits anciens découvre un poème cosmique de Lucrèce que l'on croyait disparu depuis l'Antiquité. Cette trouvaille marque le début de la Renaissance.

Un secrétaire de pape au chômage

En 1414, trois hommes se disputent la papauté en Occident : c'est le Grand Schisme. Pour y mettre fin, on réunit un concile à Constance, en Allemagne. Mais les choses se passent mal pour le pape Jean XXIII, qui est démis de ses fonctions et contraint de quitter précipitamment la ville. Son secrétaire Poggio Bracciolini, dit le Pogge, se retrouve soudain sans emploi. Il en profite alors pour assouvir sa passion pour les manuscrits anciens et visite les monastères de Suisse et d'Allemagne, dans l'espoir de mettre la main sur des documents peu connus.

Un trésor oublié

C'est probablement dans la bibliothèque de l'abbaye allemande de Fulda, en 1417, que le Pogge met la main sur un manuscrit du IXe siècle dans lequel est consignée une œuvre célèbre du Ier siècle avant notre ère. Intitulée *De rerum natura* ou *De la nature des choses*, l'œuvre est un poème de plus de sept mille vers attribué à Lucrèce (vers 98-55 av. notre ère) que les hommes du Moyen Âge croyaient perdu à jamais. Le Pogge se met rapidement au travail pour recopier le texte.

> *« Les poèmes du sublime Lucrèce ne périront que le jour où le monde entier sera détruit. »*
>
> Ovide, *Les Amours*, livre I, Élégie 15, 19 av. notre ère.

La renaissance de l'atomisme

Dans les années qui suivent, une cinquantaine de copies sont en circulation car les savants y découvrent des idées qui les fascinent. Dans son poème, Lucrèce expose en effet la pensée du philosophe grec Épicure (341-270 av. notre ère) qui considère que tout ce qui existe est composé d'atomes se mouvant au hasard dans le vide. Contrairement aux modèles chrétiens et aristotéliciens, la philosophie de Lucrèce explique les phénomènes par leur cause matérielle et non leur finalité. Imprimé dès 1473, le poème de Lucrèce influence l'œuvre des grands philosophes du XVIe siècle.

Un écrin pour les joyaux de la pensée

Au Moyen Âge, les abbayes conservent souvent de très riches collections de manuscrits que les moines recopient péniblement. Fondée en Suisse au VIIIe siècle, l'abbaye de Saint-Gall, visitée par le Pogge lors de son périple, possède l'une des plus belles collections de manuscrits de cette époque. La bibliothèque sera réaménagée dans un style baroque exubérant au XVIIIe siècle.

Bibliothèque de l'abbaye de Saint-Gall (Suisse).

L'atomisme

Attribuée à Leucippe et à son élève Démocrite (► – 430), au Ve siècle avant notre ère, la pensée atomiste consiste à postuler que toutes les choses sont faites de constituants indivisibles séparés par du vide. Le concept des atomes décrits comme insécables, indestructibles et en mouvement perpétuel, est repris par Platon (vers 427-vers 348 av. notre ère), mais rejeté par Aristote (384-322 av. notre ère). C'est à l'époque moderne que des savants comme Robert Boyle (► 1659) en feront le fondement de la chimie. Et ce n'est qu'au début du XXe siècle que l'existence réelle des atomes fait consensus.

« Mais les atomes purs, germes simples des corps,
Forts de leur unité, dans l'absolu du vide,
Sans obstacle étranger vont où leur poids les guide. »

Lucrèce, *De la nature des choses*, Ier siècle av. notre ère.

Redécouverte de Lucrèce par le Pogge **1417**

1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500

Averroès commente Aristote 1169

1200 L'université à Paris

1277 Censure à l'université de Paris

1321 Mort de Dante

1427 Découverte des Açores par des navigateurs portugais

Dénonciation de l'astrologie par Jean Pic de La Mirandole 1496

1448 Gutenberg crée le premier atelier d'imprimerie

Johannes Gutenberg
vers 1400-1468

Johannes Gutenberg invente des caractères d'imprimerie métalliques mobiles qui rendent possible l'impression de livres en série. Dans son atelier de typographie, le premier du genre, il forme des artisans-imprimeurs qui vont diffuser ces nouvelles techniques en Europe.

Un orfèvre d'inventivité

C'est à Mayence, dans sa ville natale, que Johannes Gutenberg s'initie aux techniques de l'orfèvrerie et de la métallurgie. Il polit des pierres précieuses, produit en série des petits miroirs, puis s'intéresse aux techniques d'impression.

Si la gravure sur bois permet au XVe siècle de reproduire des dessins, Gutenberg adapte et réinvente ces techniques pour imprimer des textes. Il conçoit ainsi une nouvelle presse à bras, une encre plus tenace et, surtout, des caractères mobiles et réutilisables. Faits d'un alliage d'étain, de plomb et d'antimoine, qui restera en usage jusqu'au XXe siècle, ces caractères, réalisés dans un moule de sa conception, sont particulièrement résistants.

Une excellente impression

Tous les éléments sont alors réunis pour imprimer des livres en série. En 1448, Gutenberg s'associe à un riche marchand, Johann Fust (vers 1400-1466), pour créer un atelier d'imprimerie à Mayence. C'est le premier atelier de typographie moderne d'Europe. Là, Gutenberg et Fust impriment un calendrier, une bible et des lettres d'indulgence. Ils forment également des apprentis qui vont répandre les techniques de l'imprimerie partout en Europe.

Des livres à profusion

La diffusion de l'imprimerie est étonnamment rapide. Dès 1471, des imprimeurs sont actifs dans une douzaine de villes d'Europe, comme Paris, Rome et Venise. Vers 1480, l'imprimerie atteint l'Angleterre, la Hongrie et la Pologne, avant d'arriver bientôt en Suède et au Portugal.

Les imprimeurs disposent en effet d'un atout économique considérable. Ils peuvent produire des livres beaucoup plus rapidement – plus de huit millions d'ouvrages sont produits en Europe dans la seconde moitié du XVe siècle – et à des coûts nettement moins élevés que les copistes, qui jusqu'alors reproduisaient les manuscrits à la main. L'effondrement des prix entraîne une démocratisation des savoirs.

Innovations techniques

700 800 900 1000

720 Invention d'une horloge mécanique par Liang Lingzan

Fabrique de papier à Bagdad 794

Publication de la recette de la poudre à canon 1044

L'art de l'imprimerie typographique

Pour reproduire un texte, il faut d'abord assembler des caractères pour former des mots dans un composteur, en intercalant des blancs entre les mots. Les lignes ainsi composées sont ensuite placées sur un plateau appelé galée. Enfin, les lignes sont posées et bloquées sur le marbre – la partie plate et immobile de la presse –, avant d'être encrées. Le papier peut alors être imprimé.

Une imprimerie au XVI^e siècle, extrait des *Chants royaux sur la Conception*, 1519-1528.

Une histoire de caractère

L'imprimerie apparaît en Asie bien avant les travaux de Gutenberg. Un forgeron chinois, Bi Cheng, développe des caractères mobiles en argile vers 1040. Et aux XIII^e et XIV^e siècles, des typographes coréens impriment manuellement des livres avec des caractères mobiles en métal. Gutenberg, qui ne connaît pas le travail des imprimeurs asiatiques, réinvente beaucoup de ces techniques. Mais pour la première fois, il utilise la presse – Inspirée du pressoir à vin – pour imprimer des textes. Il fait aussi deux innovations qui lui sont propres : le moule et l'alliage d'étain, plomb et antimoine qui lui permettent de fabriquer des caractères mobiles de grande qualité.

Premier atelier d'imprimerie **1448**

1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500

1180 Arrivée des moulins à vent en France

1194 Début de la construction de la cathédrale de Chartres

Invention des lunettes de correction 1285

1364 Horloge astronomique à Padoue

1482

Léonard de Vinci innove sur tous les fronts

Léonard de Vinci
1452-1519

Archétype du génie de la Renaissance, Léonard de Vinci est engagé comme ingénieur militaire par le duc de Milan. Il met dès lors son talent au service des puissants.

Un homme à tout faire

Léonard de Vinci n'est pas un savant comme les autres. Fils illégitime d'un notable florentin et d'une humble paysanne, il ne bénéficie d'aucune formation universitaire. C'est dans les ateliers du peintre florentin Andrea di Cione, dit il Verrocchio (1435-1488), au contact direct des avant-gardes artistiques, scientifiques et techniques, qu'il s'instruit.

En 1482, à la recherche d'un mécène, Léonard envoie une lettre au futur duc de Milan (1452-1508) dans laquelle il dresse la liste de toutes les merveilles qu'il est capable de réaliser : des ponts légers et faciles à transporter, de véritables chars d'assaut pour prendre les forteresses ennemies, des navires qui résistent au feu… Le jeune ingénieur affirme également pouvoir égaler n'importe quel architecte ou sculpteur de son époque. Étonnamment, il ne mentionne pas la peinture, pour laquelle il deviendra si célèbre.

> *« Je puis construire des voitures couvertes et indestructibles portant de l'artillerie et qui, ouvrant les rangs de l'ennemi, briseraient les troupes les plus solides. »*
>
> Léonard de Vinci, *Codex Atlanticus*, XV^e^-XVI^e^ siècles.

Un génie au service de l'État

Léonard de Vinci est engagé ! En ces temps de guerres incessantes, l'usage de l'artillerie à poudre dans le siège des villes fortifiées et des forteresses est crucial (▶ 1600). D'autant que l'Italie de la fin du XV^e^ siècle, morcelée entre plusieurs États rivaux, est faible d'un point de vue politique, ce qui attise les ambitions des monarchies européennes.

La créativité de Léonard de Vinci dans la conception de machines de guerre, allant de la catapulte à la mitrailleuse, s'avère inépuisable. Comme les nombreux ingénieurs italiens de l'époque, il participe à la défense et à la construction de l'État. Lorsque le duc de Milan est destitué par les troupes françaises de Louis XII, Léonard met ses talents d'ingénieur et d'artiste au service d'autres États italiens – Venise, Florence ou Rome – avant d'être invité par François I^er^ à rejoindre la France, où il finit ses jours.

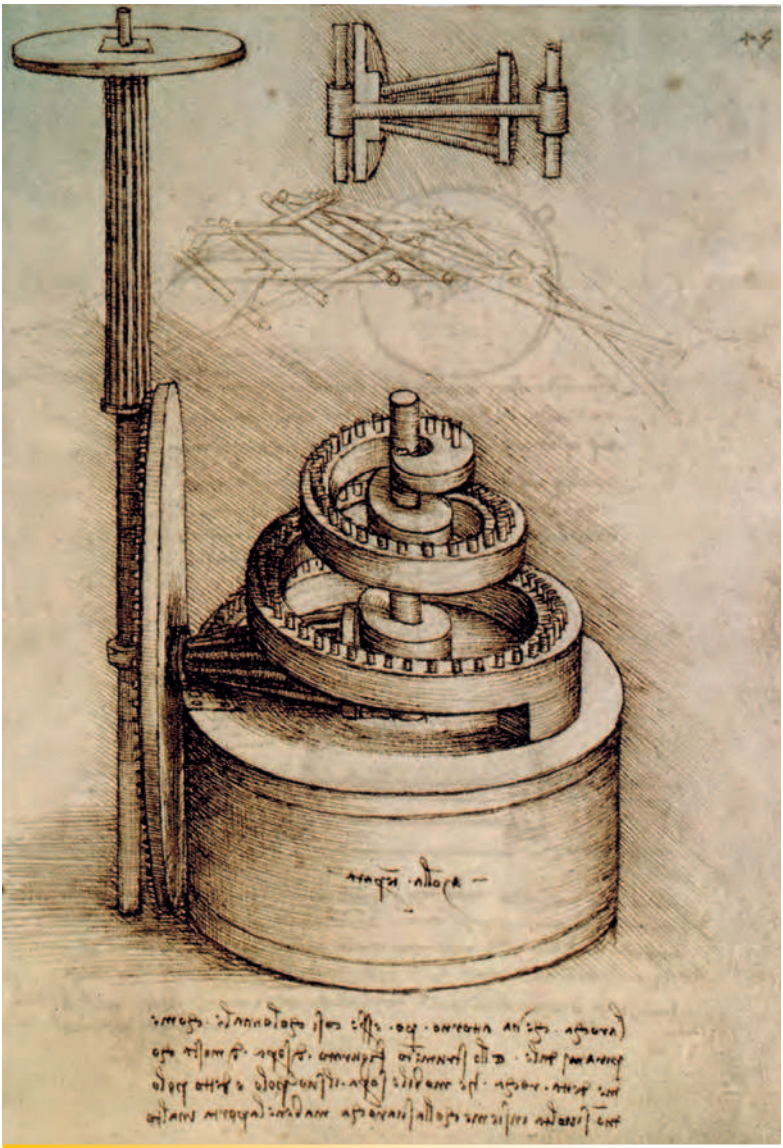
Innovations techniques

700 800 900 1000

720 Invention d'une horloge mécanique par Liang Lingzan

Fabrique de papier à Bagdad 794

Publication de la recette de la poudre à canon 1044



Une science ancrée dans l'observation

Les quelque treize mille pages des carnets de Léonard de Vinci livrent une série impressionnante d'études qui touchent à un grand nombre de domaines, allant de l'anatomie à la cinématique. On décèle pourtant une grande unité de méthode chez cet homme, qui parvient à combiner traditions techniques orales et culture littéraire. Ne maîtrisant ni le latin, la langue des savants de son époque, ni le grec, Léonard s'appuie sur un sens aigu de l'observation.

Léonard de Vinci, « Transmission du mouvement et de la force au moyen de roues dentées, de vis sans fin et de leviers », *Traité de statique et de mécanique en italien*, Codex Madrid I, 1493.

Traduire
les sciences

Pour les civilisations médiévales, la traduction joue un rôle essentiel dans la préservation des connaissances de l'Antiquité et la production de nouvelles traditions intellectuelles. À plusieurs reprises, des mouvements de traduction impliquant plusieurs langues – grec, persan, sanscrit, syriaque, arabe, latin – accélèrent la circulation des savoirs.

L'Asie, au carrefour des sciences

Même s'ils puisent leurs savoirs en terres étrangères, les anciens Grecs traduisent assez peu. En Orient, au contraire, cette tradition est forte. En Chine, on cultive depuis longtemps la traduction de textes bouddhistes en provenance d'Inde, mais aussi, au passage, celle de traités d'astronomie ou de médecine. En Inde, où se côtoient de très nombreuses langues, on traduit, vers 150 de notre ère, des ouvrages d'astronomie grecs qui vont circuler jusqu'au Japon. Et un peu plus à l'ouest, à Gundishapur, capitale de l'Empire perse sassanide, on rapporte l'existence d'une importante école de médecine dans laquelle les traités grecs sont traduits vers le syriaque à côté de travaux médicaux indiens.

De savants traducteurs

Ces initiatives servent ainsi de modèle au vaste programme de traduction vers l'arabe entrepris au VIII^e^ siècle à Bagdad par la dynastie des Abbassides. Souvent l'œuvre de chrétiens nestoriens ou des membres de minorités ethniques ou religieuses, les traductions ont pour but premier la collecte de savoirs médicaux et juridiques – Hippocrate, Galien et Aristote étant les auteurs les plus appréciés. Bientôt, les élites de l'empire étendent les traductions à la philosophie, aux mathématiques et à l'astronomie.

Avec l'adoption du papier – technique importée de Chine au VIII^e^ siècle –, le mouvement de traduction vers l'arabe prend une ampleur extraordinaire. Vers le XII^e^ siècle, la quasi totalité des écrits de l'Antiquité grecque est traduite en arabe, cette dernière devenant la langue de référence pour les sciences. Avec les croisades et l'intensification des échanges dans le bassin méditerranéen, c'est par le biais de cette langue, qui incorpore de nombreux néologismes scientifiques grecs, sanskrit ou persan, que les chrétiens d'Europe occidentale vont renouer avec l'héritage grec.

Traductions et renaissances

Les traductions latines des textes arabes prennent place aux côtés de celles faites dans l'Antiquité tardive, directement à partir du grec, notamment de celles de Boèce. La première vague de traduction a lieu dès le XII^e siècle. Des écoles de traducteurs, dont la plus connue est celle de Tolède, traduisent ainsi des ouvrages médicaux, astronomiques et philosophiques de l'arabe au latin. La culture universitaire, qui émerge dans toute l'Europe occidentale, s'appuie sur ces traductions pour introduire la philosophie aristotélicienne dans la pensée scolastique.

La prise de Constantinople par les Ottomans, en 1453, conduit plusieurs savants de Byzance à émigrer vers l'Italie. C'est une nouvelle vague de traduction, directement du grec au latin cette fois, qui commence. On redécouvre ainsi la *Géographie* de Ptolémée, qui guidera les navigateurs vers l'Inde ou le Nouveau Monde, et la philosophie platonicienne qui fonde l'humanisme de la Renaissance du XV^e siècle.

« *De la traduction, toute la science a reçu sa progéniture.* »

Giordano Bruno, cité dans la préface de la traduction des *Essais* de Montaigne de John Florio, vers 1584.

Traduire et améliorer les sciences

Les experts qui traduisent les textes scientifiques développent rapidement une expertise technique. Ils sont, dès lors, tentés d'y mettre leur grain de sel et de clarifier les propos. Les différentes versions de la *Syntaxe mathématique* de Claude Ptolémée (▸ 127), connue en occident comme l'*Almageste* (de l'arabe « le plus grand »), en fournissent un exemple éclairant. Le texte original est ici agrémenté de discussions sur le changement de la durée de l'année solaire, ainsi que de tables et de catalogues d'étoiles qui résultent d'observations nouvelles.

Ptolémée, L'*Almageste*, d'après la traduction de Thābit Ibn Qurra, 1401-1500.

Dénombrer, compter, calculer

Le concept de nombre paraît simple. Mais son histoire fait apparaître trois sciences distinctes : la numération, qui est l'art de représenter les nombres, la logistique, qui rassemble les techniques permettant d'effectuer des calculs, et l'arithmétique, qui en étudie les propriétés, et détermine par exemple s'ils sont pairs ou premiers.

Le secret des nombres

Qu'est-ce qu'un nombre ? Pour Euclide (► – 300), la réponse est simple : il s'agit d'une collection d'unités. En ce sens, le nombre ne peut être qu'entier et positif. Si des mathématiciens comme Diophante, au IIIe siècle de notre ère, développent l'arithmétique euclidienne, plusieurs auteurs s'attachent alors à élaborer une véritable théologie des nombres, les premiers chrétiens cherchant à y percevoir les secrets de l'ordre cosmique établi par Dieu. Pendant tout le Moyen Âge, le « comput », c'est-à-dire les méthodes permettant de calculer la date de Pâques, une préoccupation majeure des théologiens.

Des cailloux pour calculer

Les anciens Grecs pensaient que les nombres avaient été inventés par les marchands phéniciens dans le but de tenir leurs comptes. Et si nous savons désormais que leur usage est bien plus ancien (► – 3000), les Phéniciens ont sans doute introduit une nouvelle forme de numération dans laquelle les nombres sont représentés par des lettres de l'alphabet. Seulement, tout comme les chiffres romains en usage dans le bassin méditerranéen, cette façon d'écrire les nombres n'est guère pratique dès lors qu'il s'agit d'effectuer des calculs. D'où le recours à des instruments comme le boulier, connu en Chine dès l'Antiquité, et l'abaque occidental. Ce dernier est le plus souvent une table sur laquelle on déplace, de case en case, des jetons ou des petits cailloux… que les Latins appellent *calculi*, d'où vient le mot « calcul ».

Un zéro qui change tout

En 662, l'évêque syrien Sévère Sebokht (575-667), par ailleurs astronome, raconte que les Indiens effectuent des calculs à l'aide de neuf symboles par le biais d'une méthode qu'il trouve « indescriptible ». Un siècle plus tard, des diplomates indiens introduisent la numération en base 10 à Bagdad, et, vers 820, le grand savant

al-Khwarizmi dédie un ouvrage entier à l'addition et à la soustraction suivant le calcul indien. Dans ce livre, l'auteur insiste sur l'usage du zéro, qui permet de représenter les grands nombres.

Dès lors, ces chiffres se diffusent lentement le long des routes commerciales autour de la Méditerranée (► 999). À la fin du XII^e siècle, un certain Leonardo Fibonacci, fils d'un marchand de Pise (1175-1240), est initié à l'art du calcul indien lors d'un séjour en Tunisie. Pendant plus de trois siècles, le *Liber abaci* (*Livre du calcul*) qu'il compose servira de manuel de base dans les écoles d'abaque où l'élite marchande italienne éduque sa jeunesse.

Quand l'algèbre multiplie les nombres

Si Diophante avait déjà résolu une centaine d'équations algébriques, al-Khwarizmi donne une méthode générale pour résoudre des équations dans son célèbre traité d'algèbre (► 833). L'innovation mathématique que l'algèbre représente fait évoluer le concept de nombre : à côté des entiers, les fractions et les racines carrées assument le statut de nombre. Au début de la Renaissance, les algébristes italiens créeront même des racines de nombres négatifs que nous appelons nombres imaginaires. Numération, logistique et arithmétique se rencontrent enfin… ce qui change les mathématiques pour toujours.

Deux façons de calculer

La muse de l'arithmétique, dont la robe est couverte de chiffres, indique deux manières différentes d'effectuer des opérations de calcul. À droite, Pythagore déplace des jetons sur les lignes tracées sur la table : c'est l'abaque occidental en usage pendant tout le Moyen Âge. À gauche, Boèce s'initie aux techniques algorithmiques de calcul qui parviennent en Europe par l'intermédiaire des savants de langue arabe.

Gregor Reisch, *Margarita Philosophica*, 1496.

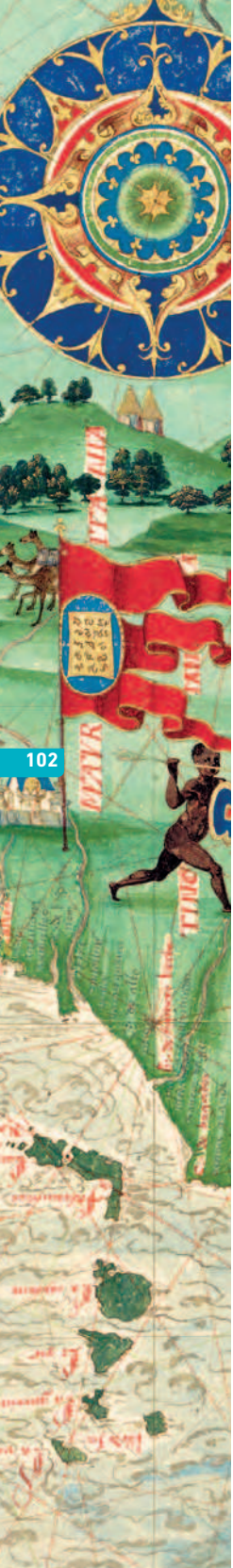
ETHIOPIA
NATVRA
LIBIA
Barbaria

De nouveaux mondes, de nouvelles sciences

1500–1770

La Renaissance connaît un tel renouvellement des savoirs et des techniques qu'on a longtemps nommé cette période, tout simplement, la « Révolution scientifique ». Sans doute y aurait-il lieu de nuancer l'impression de discontinuité historique véhiculée par cette expression. Mais il n'en reste pas moins que c'est à cette époque que l'expérience s'impose véritablement comme moyen d'accès privilégié à des nouveautés scientifiques. Sciences et techniques se mettent alors, pour leur plus grand bénéfice, au service des puissances politiques.

Guillaume Le Testu, *Cosmographie universelle* (détail montrant des scènes de chasse et de bataille en Afrique de l'Ouest), 1555.



De nouveaux mondes, de nouvelles sciences

1500–1770

L'élargissement du monde

Lorsque Christophe Colomb (v. 1451-1506) met le pied en Amérique (▸ 1493), l'Europe a déjà amorcé un processus qui bouleverse sa relation au savoir. La découverte du nouveau continent s'inscrit dans un mouvement d'expansion sans précédent, qui s'appuie sur de nombreuses innovations techniques. La caravelle permet de naviguer en haute mer, l'astronomie et la boussole de s'y orienter (▸ 82), de nouvelles techniques cartographiques fixent sur le papier des représentations fidèles des territoires abordés et de larges enquêtes en recensent les richesses (▸ 1503). Tandis que les navigateurs portugais contournent l'Afrique en vue de commercer avec l'Asie, Colomb convainc les monarques espagnols de financer sa tentative de l'atteindre en se lançant vers l'ouest.

Retour vers le passé

C'est, entre autres, grâce à la redécouverte de la *Géographie* de Ptolémée (▸ 127) que Colomb a cette idée. Dès le XIV^e^ siècle, les humanistes italiens comme le Pogge (▸ 1417) se prennent en effet de passion pour les manuscrits de l'Antiquité. À cette époque, et plus encore avec la chute de Constantinople en 1453, les savants byzantins introduisent ainsi des textes grecs, comme ceux de Platon ou de Ptolémée, souvent ignorés des érudits médiévaux. Peu à peu, la connaissance des sciences antiques s'étoffe, de nouvelles idées apparaissent et les remettent en question. Bientôt, Nicolas Copernic propose de revoir l'astronomie ptoléméenne et de placer la Terre en orbite autour du Soleil (▸ 1543, p. 112). Au même moment, André Vésale révise les notions d'anatomie héritée de Galien (▸ 1543, p. 114).

L'âge du faire

Au mouvement des idées s'ajoute un nouvel intérêt pour les techniques, comme en témoigne la multiplication de livres compilant les savoir-faire semblables à celui d'Agricola sur les mines (► 1556). Parallèlement, l'invention ou le perfectionnement de certains instruments, tels que la lunette astronomique de Galilée (► 1610), donnent à voir des choses que personne n'a jamais vues. D'autres, comme le baromètre de Torricelli (► 1644) et la machine pneumatique de Boyle (► 1659) confirment la possibilité de fonder les démonstrations scientifiques sur l'expérience. Le chancelier Bacon (► 1620), le philosophe Descartes (► 1633) et le mathématicien Newton (► 1687) s'appuient sur ces découvertes et développent les nouveaux systèmes philosophiques de la modernité.

Les sciences au service de l'État

Les besoins de la guerre attirent vite l'attention des gouvernants vers les savants (► 1600). Les grandes puissances coloniales comme la France et l'Angleterre se dotent d'institutions, telles que l'Académie des sciences (► 1666, p. 138), entièrement consacrées au développement de l'expertise scientifique. La mainmise de l'État sur les sciences encourage le développement des savoirs utiles. Linné produit une classification des plantes (► 1735) qui aide à leur acclimatation en Europe, notamment au Jardin des plantes dirigé par Buffon (► 1739). Le roi de Prusse demande au mathématicien Euler de travailler à améliorer l'efficacité de son artillerie (► 1745). En même temps, on commence à désirer que les lumières scientifiques soient largement diffusées : c'est ainsi que naît le formidable projet de l'*Encyclopédie* (► 1751).

1493
Conquête européenne du Nouveau Monde

1626
Introduction de la lunette astronomique de Galilée en Chine

1543
Vésale, *La Fabrique du corps humain*

1620
Francis Bacon, *Instauratio Magna*

1527
Théorie médicale de Paracelse

1610
Galilée, *Messager céleste*

1480 1500 1520 1540 1560 1580 1600 1620

1492-1504 Voyages de Christophe Colomb

1517 Thèses de Luther, début de la Réformation

1519-1556 Charles Quint, empereur d'Allemagne

Fondation de la ville de Québec 1608

Guerre de Trente Ans 1618-1638

1543
Copernic, *Des révolutions des orbes célestes*

1556
Agricola, traité technique *De re metallica*

1614
Invention des logarithmes par John Napier

1628
Démonstration de la circulation sanguine par Harvey

1633
Descartes, *Système du Monde*

1644
Principe du baromètre par Torricelli

1659
Perfectionnement de la machine pneumatique par Boyle et Hooke

1696
L'Hospital, *Analyse des infiniment petits*

1739
Buffon au Jardin du roi

1751
Parution du premier tome de l'*Encyclopédie*

1756
Traduction de Newton en français par Émilie Du Châtelet

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1643-1715 Règne de Louis XIV

1682 Louis XIV s'installe à Versailles

1688-1689 Glorieuse révolution en Angleterre

Règne de Frédéric II de Prusse 1740-1786

Guerre de Sept Ans 1756-1763

1655
Ole Worm constitue un célèbre cabinet de curiosités

1666
Fondation de l'Académie des sciences par Colbert

Marie Meurdrac, *La Chymie charitable et facile en faveur des dames*

1687
Newton, *Principia mathematica*

1735
Linné, *Système de la nature*

1745
Étude de la trajectoire d'un boulet de canon dans l'air par Euler

1761
Invention du chronomètre de marine

1768
Cartographie des côtes de l'hémisphère austral par James Cook

1493

Les épidémies colonisent l'Amérique

Au XVIe siècle, de grandes épidémies ravagent l'Amérique centrale et les Caraïbes. Ces pandémies, et tout particulièrement celles de varioles, sont un des facteurs clé de la conquête européenne du Nouveau Monde.

Une rencontre funeste

En 1493, lors de son deuxième voyage en Amérique, Christophe Colomb installe la première colonie espagnole sur l'île d'Hispaniola, l'actuelle Saint-Domingue ou Haïti. Rapidement, la population native de l'île est ravagée par une épidémie de grippe. En vingt ans, elle passe d'environ trois millions d'habitants, au moment de l'arrivée des Espagnols, à seulement quelques centaines.

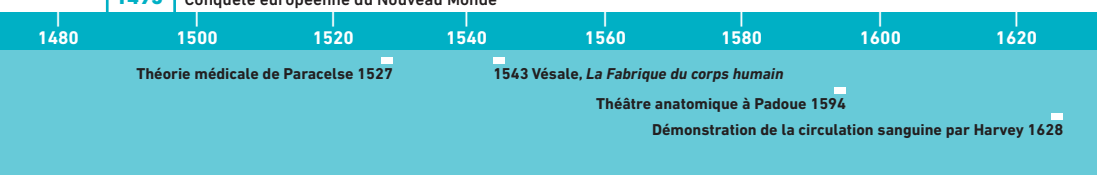
La première grande épidémie de variole en Amérique a également lieu à Hispaniola en 1518, et arrive au Mexique deux ans après, en 1520, avec les expéditions d'Hernán Cortés (1485-1547). La capitale de l'Empire aztèque, Tenochtitlán (Mexico), perd un tiers de sa population, ce qui facilite sa conquête par les Espagnols. L'épidémie continue son expansion vers le sud, jusqu'à l'Empire inca, qui sera dévasté avant même l'arrivée des conquistadors en 1531.

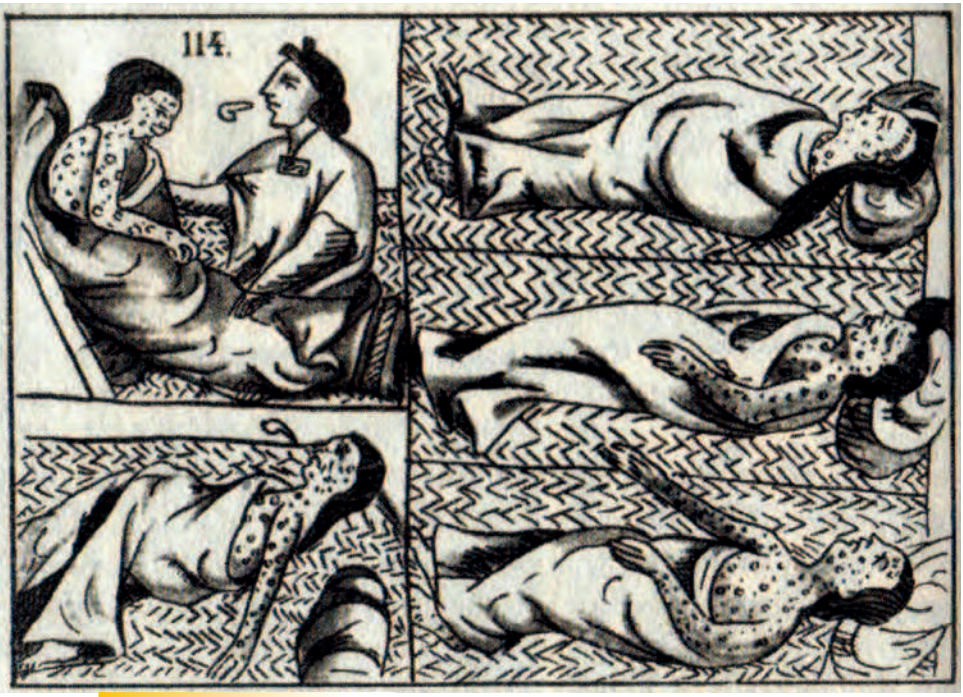
Dépeuplement et conquête de l'Amérique

Des épidémies de variole, typhus, grippe, diphtérie, rougeole et cocoliztli (une fièvre hémorragique) se succèdent ainsi en Amérique jusqu'au début du XVIIe siècle avec l'introduction de bétail et de nouvelles pratiques agricoles par les colons espagnols. Ces maladies provoquent la mort de 90 % de la population native d'Amérique.

> *« Une grande peste se rependit entre nous [...] elle s'étendit partout, par le visage, la tête, la poitrine, etc. [...] Nombreux sont morts ainsi, mais d'autres sont aussi morts de faim, personne ne s'occupait de personne [...] quelques-uns sont restés aveugles... »*
>
> Témoignage d'un indigène, cité par Germán Somolinos d'Ardois, *Les Épidémies au Mexique*, 1982.

L'effondrement démographique détruit des structures sociales indigènes, et entraîne une hégémonie militaire et économique des Espagnols. Les conquérants ont dès lors recours à l'importation d'esclaves africains pour remplacer la main-d'œuvre dont ils ont besoin. L'appropriation des ressources du Nouveau Monde par les Européens va donner un avantage décisif à l'Europe dans son développement économique, et permettre un essor culturel et scientifique du vieux continent.





Une encyclopédie du monde aztèque

Les effets des épidémies sont décrits par des chroniqueurs espagnols comme Bernardino de Sahagún (1500-1590). Dans son *Historia general de las cosas de Nueva España* (Histoire générale des choses de la Nouvelle-Espagne), ce missionnaire détaille les effets de la variole (ou petite vérole) mais documente aussi la langue, la religion, la culture, l'histoire naturelle et les structures sociales et économiques des Aztèques.

Représentations de la vérole dans *Historia general de las cosas de Nueva España*, Bernardino de Sahagún, 1558-1577.

Les « échanges colombiens »

La propagation de maladies en Amérique au XVe siècle illustre un transfert bien plus large entre l'Ancien et le Nouveau Monde, qui s'est déroulé à la suite de la découverte de l'Amérique et que l'on a baptisé l'« échange colombien » ou le « grand échange ». Ce dernier a entraîné le transfert de nombreuses espèces animales et végétales entre ces deux mondes. Pour ne citer que quelques exemples, c'est ainsi que les pommes de terre et les tomates originaires d'Amérique ont été introduites en Europe, et les chevaux et les cochons d'Europe ont été exportés vers le Nouveau Monde.

1503

La Couronne espagnole organise l'exploration du Nouveau Monde

Créé pour contrôler le commerce transatlantique et le territoire américain, la Casa de la Contratación de Séville et le Consejo de Indias contribuent à produire et à organiser les connaissances sur le Nouveau Monde.

Le port et la porte de l'Amérique

En février 1503, les rois Isabelle de Castille et Ferdinand d'Aragon ordonnent d'établir à Séville une « maison pour le commerce et la négociation avec les Indes, les Canaries, et autres terres découvertes et à découvrir ». Inspirée de l'Entrepôt de Guinée et des Indes portugais, la Casa de la Contratación (Maison du commerce) espagnole a pour but d'assurer le contrôle royal du commerce transatlantique.

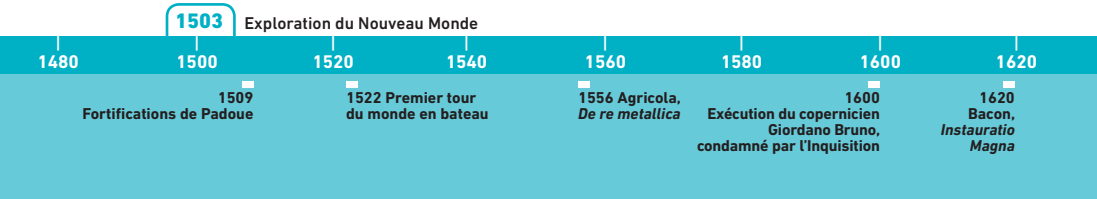
Dans les magasins de la Casa sont entreposées les marchandises qui font l'objet d'importation (argent, or, perles, cuir, cochenille, indigo, etc.) ou d'exportation (verre, eau-de-vie, arme etc.) avec les Amériques récemment découvertes. Elle a sa propre administration, sa cour de justice et ses pilotes qui enseignent l'art de naviguer et de conduire les flottes, dont le célèbre Amerigo Vespucci (1454-1512) qui est nommé pilote en chef de la Casa en 1508.

Vers un inventaire du Nouveau Monde

Parallèlement, la Casa devient le principal centre de production de cartes des territoires nouvellement conquis et des instruments de navigation en Europe. Elle est aussi, avec le Consejo de Indias (Conseil des Indes) créé en 1524, un centre de collecte et de diffusion des connaissances ethnographiques, linguistiques et botaniques sur le Nouveau Monde.

Le Consejo de Indias est ainsi à l'origine *De l'histoire naturelle des Indes*, l'un des premiers ouvrages naturalistes sur la flore et la faune des Indes, écrit en 1526 par le chroniqueur Gonzalo Fernández de Oviedo (1478-1557) à la demande de Charles V. Cette collecte d'informations naturalistes s'institutionnalise sous la direction de Juan de Ovando (1515-1575), avec la première expédition scientifique au Mexique, menée par le médecin de la cour Francisco Hernández (1515-1587).

La Casa de la Contratación et le Consejo de Indias peuvent ainsi être considérés comme les premières institutions scientifiques modernes, représentatives d'une forme de collecte d'informations et de recherche impérialiste au service d'un projet de contrôle et d'exploitation des territoires américains par la Couronne espagnole.



Les premières cartes de l'Amérique

Diego Ribero, cartographe royal à la Casa de la Contratación de Séville, est chargé du dessin du premier planisphère scientifique, basé sur des mesures empiriques de latitude. La carte montre très précisément les côtes d'Amérique centrale et du Sud. Elle représente aussi plusieurs instruments de navigation, comme le quadrant et l'astrolabe, symboles de la précision nécessaire à sa fabrication.

Détail d'une carte de Diego Ribero, 1529.

La première expédition scientifique

En 1570, le roi d'Espagne commande un inventaire des plantes médicinales américaines à Francisco Hernández. De 1572 à 1577, Hernández, accompagné de géographes, de peintres et de botanistes locaux, collecte des spécimens de la flore mexicaine, des informations sur les cultures indigènes et les épidémies (▶ 1493). Il décrit ainsi plus de trois mille plantes (comme le maïs, le tabac, le cacao, la tomate ou la pomme de terre), et plus de trois cents animaux américains. De retour en Espagne, ses manuscrits originaux sont archivés à la bibliothèque du roi et disparaissent dans un incendie en 1671. Par chance, les descriptions d'Hernández sont publiées dans différents ouvrages à partir du XVII^e siècle, attirant l'intérêt des botanistes européens sur la flore du Nouveau Monde.

Philosophie, techniques et culture

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1637 Descartes, *Discours de la méthode*

1657 Horloge de Huygens

1690 Machine à vapeur de Papin

1739 Hume, *Traité de la nature humaine*

1751 Parution du premier tome de l'*Encyclopédie*

1527

À Bâle, Paracelse critique la médecine de Galien

Paracelse
1493-1541

Contemporain des réformateurs religieux Luther et Calvin, le médecin Paracelse critique ouvertement la pratique et les savoirs médicaux traditionnels. Ses doctrines, influencées par l'alchimie et l'astrologie, inspireront de nombreux savants.

Un début en fanfare

Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim, théologien et médecin itinérant, est chargé de cours de médecine à l'université de Bâle en 1527. Il y fait scandale : il critique l'enseignement traditionnel, enseigne en allemand à la place du latin, et brûle publiquement le *Canon de la médecine* d'Avicenne.

Ridiculisé par ses opposants, il doit fuir la Suisse et, pour poursuivre ses voyages en Europe, il change de nom. Désormais, il se fait appeler Paracelse (« plus important que Celse »), en référence à un médecin romain de l'Antiquité du nom d'Aulus Cornelius Celsus (I^er^ siècle).

Défenseur de l'alchimie médicale

Paracelse critique sans relâche la médecine conventionnelle, basée sur le savoir gréco-romain. Il s'inspire des savoirs médicaux populaires, comme ceux détenus par les guérisseuses ou les barbiers-chirurgiens, assistants des médecins mais sans formation académique.

Selon lui, la maladie n'est pas due à un déséquilibre des humeurs internes, obsession de la médecine galénique (► dossier, p. 56-57), mais plutôt à des causes naturelles ou spirituelles. La maladie est localisée dans des organes spécifiques et, pour la guérir, il faut utiliser des remèdes précis, souvent des drogues d'origine minérale transformées par la pratique alchimique. Ainsi, il utilise avec un succès apparent des onguents au mercure pour traiter la syphilis, et popularise l'usage par voie interne de l'antimoine et du laudanum.

Père posthume de l'iatrochimie

Ses faibles ressources économiques et sa tendance à critiquer les puissants empêchent la publication des travaux de Paracelse de son vivant. Pourtant, ses nombreux disciples vont le considérer comme le père de l'iatrochimie ou chimie médicale. Publiés dans les années 1560, ses ouvrages deviennent très populaires et aident à associer l'enseignement de la chimie à celui de la médecine au XVII^e^ siècle.

Alchimie et astrologie

Paracelse conçoit le corps humain comme un microcosme lié en permanence au macrocosme de l'Univers. Pour lui, une force appelée « archée » ou « alchimiste » est responsable des digestions, séparations et exhalations du corps humain. Par ailleurs, chaque organe est associé à un métal et à une planète. Le médecin doit donc aussi faire appel à l'astrologie pour comprendre la santé et la maladie.

Johannes Stradamus, *Le Laboratoire de l'alchimiste*, 1570.

La magie naturelle

Pour ses théories, Paracelse s'inspire de la magie naturelle, un courant intellectuel très important au XVI^e^ siècle. Les magiciens naturels s'appuient sur divers traités comme ceux écrits par le mythique Hermès Trismégiste et compilés par Marsile Ficin (1433-1499), ou comme la kabbale juive, telle qu'elle est divulguée par Jean Pic de La Mirandole (1463-1494). Ils essaient de comprendre le monde naturel à partir de l'existence de forces occultes et d'analogies entre phénomènes naturels. Aujourd'hui considérés comme irrationnels, ces savoirs participent néanmoins à la construction de la science moderne.

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1635 Fondation du Jardin du roi à Paris

1669 Explication de la fossilisation par Steno

1675 Découverte des micro-organismes par Van Leeuwenhoek

Inoculation contre la variole à Constantinople 1714

1735 Linné, *Système de la nature*

1749 Premier tome de l'*Histoire naturelle* de Buffon

1543

Copernic
place la Terre en orbite

Nicolas Copernic
1473-1543

Dans son ouvrage *Des révolutions des orbes célestes*, Nicolas Copernic décrit un modèle cosmologique où le Soleil – et non plus la Terre – est au centre du monde. Il rompt dès lors avec une tradition millénaire et amorce un tournant décisif pour l'astronomie.

Une hypothèse audacieuse

Depuis l'Antiquité grecque, il est couramment admis que la Terre, immobile, est au centre du monde et que tournent autour d'elle les étoiles, les planètes, la Lune et le Soleil. Ce système, affiné par Ptolémée (▸ 127), va constituer la référence en Occident pendant plus de mille ans.

C'est alors que Nicolas Copernic, chanoine et astronome à la cathédrale de Frauenburg (aujourd'hui Frombork, en Pologne), propose de placer le Soleil au centre de l'Univers. Introduisant une rupture radicale dans l'organisation du cosmos établie jusque-là, il espère que son modèle permettra d'expliquer et de calculer plus simplement les positions des planètes.

Trente ans de vérifications

Dès 1510, Copernic ébauche le système héliocentrique dans le *Commentariolus* dont il fait circuler quelques exemplaires anonymement. Puis il travaille seul à son œuvre pendant plus de trente ans : il vérifie son hypothèse, réalise des calculs de position et les compare aux observations. C'est sa rencontre avec le jeune astronome Georg Joachim Rheticus (1514-1576) qui le décide à publier son travail. Son ouvrage *Des révolutions des orbes célestes* sort de l'imprimerie en mars 1543, juste après sa mort.

Une succession difficile

L'idée d'une Terre décentrée est choquante pour l'époque. Malgré cela, Copernic n'est pas inquiété par l'Église de son vivant et garde de solides appuis auprès de sa hiérarchie. De nombreux astronomes européens, comme Galilée, enseignent même le système héliocentrique à leurs élèves. La situation change au début du XVII^e^ siècle. Face à la montée du protestantisme, l'Église s'engage, pour asseoir son autorité, dans une bataille qui aboutit à la condamnation des travaux de Copernic en 1616. Malgré les arguments de Galilée (▸ 1610), ce n'est qu'à la fin du XVII^e^ siècle que se rallient la plupart des savants autour du système héliocentrique.

Une planète comme les autres

Copernic place le Soleil au centre de l'Univers. Tournent autour, dans un mouvement circulaire uniforme, Mercure, Vénus puis la Terre, celle-ci tournant sur elle-même en vingt-quatre heures avec la Lune en orbite. Viennent ensuite Mars, Jupiter, Saturne. Pour justifier son système, Copernic met en exergue les difficultés calculatoires des systèmes astronomiques existants et leur manque « d'ordre et d'harmonie ».

Gravure représentant l'Univers copernicien, *Harmonia Macrocosmica*, 1660.

« Il s'en fallut de peu que, de crainte du mépris pour la nouveauté et l'absurdité de mon opinion, je ne supprimasse tout à fait l'œuvre déjà achevée. »

Nicolas Copernic, *Des révolutions des orbes célestes, préface au pape Paul III*, 1543.

De l'utilité d'une préface

La préface, non signée, de l'ouvrage *Des révolutions des orbes célestes* fut longtemps attribuée à Copernic. Or il n'en est rien. C'est Andreas Osiander (1498-1552), relecteur de l'ouvrage, qui en est l'auteur ! Ce dernier fait alors passer le système héliocentrique pour une simple hypothèse calculatoire, ce qui favorisa sans doute la réception de cette idée nouvelle. En réalité, pour Copernic, cela ne fait aucun doute : le système héliocentrique représente bel et bien le monde tel qu'il est. C'est d'ailleurs ce qu'il exprime dans une dédicace de l'ouvrage écrite au pape Paul III où il revendique sa liberté d'expression.

1543

André Vésale étudie l'anatomie des meurtriers

André Vésale
1514-1564

C'est grâce à la dissection de cadavre de meurtriers qu'un médecin brabançon améliore la connaissance du corps humain. Il renouvelle ainsi la pratique médicale et devient le plus grand anatomiste de la Renaissance.

Des dissections instructives

Né à Bruxelles, André Vésale suit des études de médecine à l'université de Louvain, puis à Paris et à Padoue, où il commence à enseigner l'anatomie. Dans ses cours, il dénonce l'écart existant entre le savoir livresque des professeurs et la technique grossière des barbiers-chirurgiens chargés d'ouvrir les corps lors des leçons d'anatomie. Vésale décide donc de pratiquer lui-même les dissections et plaide pour l'émergence du médecin « complet », associant connaissance anatomique, capacité à poser un diagnostic et dextérité manuelle.

Une seconde vie pour les meurtriers

À Padoue, Vésale bénéficie du soutien du tribunal criminel qui met à sa disposition le corps des meurtriers exécutés. Il peut ainsi pratiquer des dissections comparées et démontre que les descriptions anatomiques de Galien correspondent, assez fréquemment, au corps d'un singe et non à celui d'un homme (▸ dossier, p. 56-57). Vésale révèle que les nerfs ne sont pas creux, fait une description détaillée du cerveau et des os du crâne et parle pour la première fois du diaphragme, des valves cardiaques ou de l'épiploon, la membrane péritonéale qui relie les viscères contenus dans l'abdomen.

> *« La description du corps humain doit être considérée à juste titre comme le fondement le plus solide de tout l'art médical et le principe de sa constitution. »*
>
> André Vésale, *La Fabrique du corps humain*, 1543.

Père de l'anatomie moderne

La Fabrique du corps humain, paru en 1543, devient le texte fondateur de l'anatomie moderne. Basé sur la dissection et illustré de belles gravures sur bois, il est divisé en sept parties : os et articulations, muscles, cœur et vaisseaux sanguins, nerfs, organes contenus dans l'abdomen, organes du thorax et cerveau. D'abord critiqué dans les milieux académiques, l'apport de Vésale marque un tournant dans la médecine. Dès le début du XVII^e^ siècle, le texte est adopté par l'ensemble de la communauté médicale et les dissections deviennent pratiques courantes dans toutes les facultés.

La dissection, une pratique controversée

Dans la période gréco-romaine, par respect des morts, l'anatomie est principalement étudiée sur des animaux. Toutefois, la dissection du corps humain est réalisée par certains savants comme Alcméon (► – 500). Au Moyen Âge, contrairement à une idée reçue, l'Église ne met pas fin à de telles pratiques mais interdit certaines profanations, comme l'amputation. À la Renaissance, les étudiants en médecine ressentent le besoin de se former à l'anatomie par l'expérience, et le vol de corps dans les cimetières ou aux gibets devient fréquent.

Michiel Jansz Van Mierevelt, *Leçon d'anatomie du docteur Willen Van der Meer à Delft*, 1617.

Rendre les corps éternels

Les difficultés associées à la conservation des cadavres sont à l'origine de nouvelles approches pédagogiques et de prouesses techniques. La céroplastie, c'est-à-dire la reproduction en cire des structures anatomiques, se développe dès la fin du XVII^e^ siècle. Au XVIII^e^ siècle, l'anatomiste Honoré Fragonard (1732-1799) devient célèbre grâce à ses écorchés, dont plusieurs humains, qu'il rend imputrescibles. Sa technique consiste à dessécher les muscles, à injecter du suif de mouton dans les vaisseaux et à vernir les corps avec des résines. Plus récemment, la plastination remplace les fluides organiques par de la silicone.

« Quiconque s'intéresse à l'art de la dissection se rend compte que rien ne leur était plus étranger que la dissection du corps humain ! »

André Vésale, *La Fabrique du corps humain*, 1543.

1640 | 1660 | 1680 | 1700 | 1720 | 1740 | 1760 | 1780

1635 Fondation du Jardin du roi à Paris

1669 Explication de la fossilisation par Steno

1675 Découverte des micro-organismes par Van Leeuwenhoek

Inoculation contre la variole à Constantinople 1714

1735 Linné, *Système de la nature*

1749 Premier tome de l'*Histoire naturelle* de Buffon

1556

Agricola décrit l'art de la métallurgie

Georg Bauer, dit Georgius Agricola
1494-1555

Georg Bauer, médecin allemand plus connu sous le nom d'Agricola, publie un traité sur les mines et la métallurgie. Cet ouvrage, un des premiers livres techniques imprimés en Europe, obtient un succès considérable aux XVIe et XVIIe siècles.

Un médecin passionné par les mines

Originaire de Saxe, Georg Bauer, dit Agricola, étudie la philosophie et la médecine aux universités de Leipzig, Bologne et Padoue. Il fréquente les milieux humanistes italiens et participe à l'édition de l'un des traités de Galien (▸ dossier, p. 56-57).

Il est ensuite employé comme docteur municipal dans plusieurs villes minières d'Europe centrale, notamment en Bohême et dans le duché de Saxe. C'est là qu'il se passionne pour les techniques d'extraction et de traitement des minerais, et s'enrichit considérablement en investissant dans les mines.

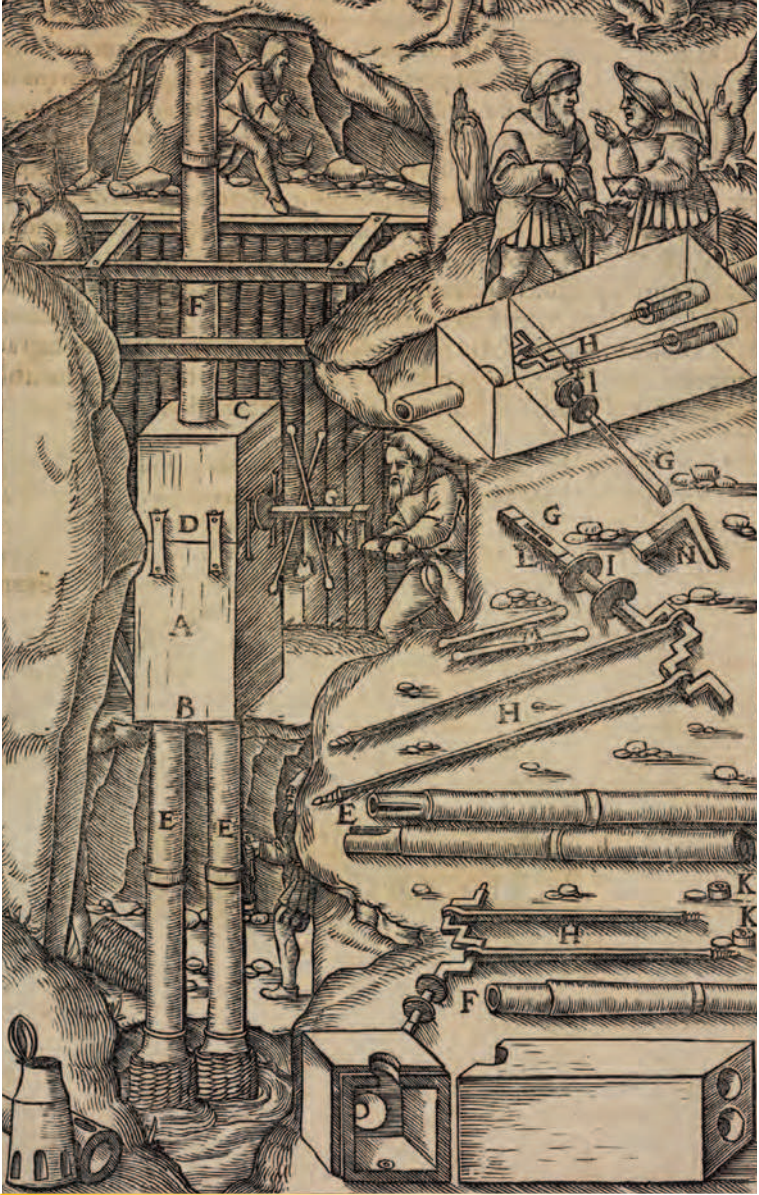
De re metallica

Agricola se consacre dès lors à la rédaction d'un ouvrage, divisé en douze livres, sur les mines et la métallurgie. Écrit en latin sur le modèle des traités techniques de l'Antiquité, le *De re metallica* offre une description précise et détaillée de tous les procédés et machines utilisés dans les mines et ateliers d'Europe centrale, l'une des plus grandes régions minières de l'époque.

L'ouvrage est exhaustif, traitant aussi bien de la découverte et de l'exploitation de nouveaux filons, que des techniques de séparation des métaux et des machines permettant d'assécher les mines. À ces descriptions, Agricola ajoute près de trois cents gravures qui, grâce à leur grande précision, permettent de reproduire les machines et procédés présentés à l'identique.

Un succès posthume

Fruit de vingt ans de travail, le *De re metallica* d'Agricola est publié de façon posthume en 1556 et rencontre, dès sa parution, un succès considérable. Il est traduit dans plusieurs langues et réédité de nombreuses fois au cours des XVIe et XVIIe siècles. Il est aussi beaucoup lu et utilisé dans les régions minières d'Europe et d'Amérique latine. Au Pérou par exemple, l'ouvrage est si précieux qu'il est enchaîné aux murs des églises !



L'invention du livre technique

Le *De re metallica*, tout comme les traités sur les mines et la métallurgie de Vannoccio Biringuccio (*De la pirotechnia*, 1540) et de Lazarus Ercker (*Traité sur les minerais et leur évaluation*, 1580), inaugurent un nouveau type d'ouvrage : le livre technique. Nombreux sont les auteurs qui, à partir de la seconde moitié du XVI^e^ siècle, vont, sur ce modèle, faire des descriptions détaillées des technologies. Ces livres et leurs illustrations permettent la transmission des savoirs. Ils pérennisent ainsi les techniques et les rendent cumulatives.

Pompe à eau utilisée dans les mines d'Europe centrale, gravure extraite du *De re metallica* d'Agricola, 1556.

1600

Les applications militaires fortifient la géométrie

Jean Errard
vers 1554-1610

Au tournant du XVI^e^ et du XVII^e^ siècle, l'usage de l'artillerie bouleverse les techniques de siège et l'art de la fortification. Le cas de Jean Errard, ingénieur au service de Henri IV, montre comment les mathématiques sont mises au service de la guerre.

Le siège de velours

En 1597, le roi de France Henri IV attaque les troupes espagnoles à Amiens. Prévoyant une longue attente, les troupes françaises s'installent confortablement autour de la ville, si bien qu'on appelle cette opération le « siège de velours ».

Après six mois, les Français s'emparent enfin de la ville. Le roi ordonne alors à son ingénieur Jean Errard, natif de Bar-le-Duc, de concevoir de nouvelles fortifications pour la ville reconquise. Trois ans plus tard, en 1600, il fait paraître, aux frais du roi, la *Fortification démontrée et réduite en art*. Il s'agit du premier traité de génie militaire écrit en français.

Un ingénieur au Conseil du roi

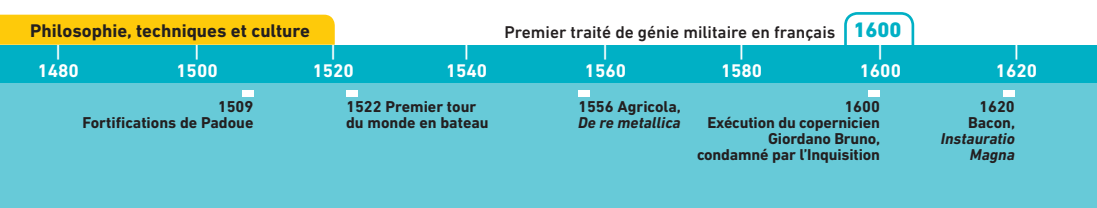
Protestant, Jean Errard est autrefois contraint de s'exiler en Allemagne pour étudier et poursuit sans doute sa formation en Italie, où il se familiarise avec les nouvelles techniques de fortification. Se mettant d'abord au service de Charles III de Lorraine, il publie en 1584 une description d'instruments mathématiques (compas, règles, cadrans, etc.). C'est alors que Henri IV le remarque.

Bientôt Errard devient premier ingénieur du roi et il est admis au Conseil royal. Parmi ses missions, il fortifie les villes de Sedan et de Montreuil. En 1594, il rédige l'un des premiers manuels de géométrie en français *La Géométrie et pratique générale d'icelle*.

Euclide s'en va en guerre

Dans la *Fortification démontrée et réduite en art*, apparaissent clairement les méthodes de fortifications inventées par les ingénieurs italiens. Errard y utilise la géométrie euclidienne pour décrire la manière dont il faut tracer des bastions et des contreforts efficaces, permettant de voir et de contrer aisément toute attaque ennemie.

Sous Louis XIV, l'ingénieur Sébastien Le Prestre de Vauban (1633-1707) perfectionne ces méthodes et change le visage des villes-frontières de toute la France. On accorde dès lors une grande importance aux mathématiques qui sont enseignées aux artilleurs et ingénieurs militaires.



Henri IV au siège de velours

Dans les guerres de siège des XVI^e^ et XVII^e^ siècles, l'artillerie modifie les techniques de combats. Le rôle des ingénieurs qui accompagnent les armées devient crucial, puisque ce sont eux qui conçoivent bastions et tranchées. Sur cette peinture, on remarque, à droite, les fortifications temporaires érigées pour accueillir les canons de l'armée assiégeante.

Tableau montrant Henri IV au siège d'Amiens, anonyme.

« Sire, puisque votre majesté nous fait espérer, par l'académie qu'elle a ordonné être dressée en cette ville de Paris, de voir ressusciter et revivre les sciences, de longtemps mortes en ce royaume et que les gentilshommes ont été contraints de chercher et aller mendier en pays étrangers, j'ai pensé que ce ne serait [pas] mal à propos de lui dédier cette œuvre [...] comprenant ce qui est de plus et plus rare en la géométrie. »

Jean Errard, *La Géométrie et pratique générale d'icelle*, 1594.

La « réduction en art », une pratique savante

Dans la *Fortification démontrée et réduite en art*, Errard cherche à rassembler en un ordre méthodique des savoirs épars, fragmentaires et souvent non écrits. La pratique de la « réduction en art » s'appuie sur les mathématiques, la rhétorique et une grande quantité de figures afin de rendre accessibles des savoirs auparavant réservés aux « gens du métier ». Cette entreprise touche de nombreux domaines : la danse, le dessin, l'architecture, mais aussi la grammaire, l'art des mines, l'escrime, ou encore la conception des jardins. Désireux de contribuer au bien public, les ingénieurs imposent une forme de discours technique qui est appelé à un bel avenir.

1610

Galilée se fait messager céleste

Galileo Galilei, dit Galilée
1564-1642

En révélant des astres et de nouveaux phénomènes astronomiques, Galilée sème le doute à propos de la cosmologie aristotélicienne, et incite à accepter la vision héliocentrique du Système solaire.

Un regard nouveau sur le firmament

Au printemps 1609, Galilée, professeur de mathématiques à l'université de Padoue, entend parler d'un instrument hollandais qui fait apparaître les objets éloignés comme s'ils étaient proches. Entrevoyant son utilité pour la navigation, il construit une lunette similaire et l'offre au sénat de Venise.

Galilée continue de perfectionner l'instrument et obtient un modèle capable d'augmenter vingt fois la taille apparente des objets lointains. Le tournant vers la Lune, il y découvre l'existence de montagnes et de cratères. Il observe également quatre satellites autour de Jupiter, jusque-là inconnus, et une Voie lactée composée de milliers d'étoiles.

Des découvertes mal vues

Dès mars 1610, Galilée publie ces découvertes dans *Sidereus Nuncius* (*Le Messager céleste*). Dédié à Côme de Médicis, grand-duc de Toscane, les satellites de Jupiter y sont baptisés « étoiles médicéennes ». Un geste qui lui vaut le poste de mathématicien et philosophe à la cour du prince.

Malgré l'appui de ses influents patrons, la publication du livre soulève une violente controverse. Certains astronomes et philosophes affirment que les observations de Galilée, qui contredisent la cosmologie aristotélicienne, ne sont que des illusions optiques produites par la lunette. Pourtant, ces observations sont définitivement confirmées, fin 1610, par les astronomes jésuites du Collège romain (▸ 1626).

À l'appui de Copernic

À Florence, Galilée poursuit son examen du ciel avec sa lunette. Les observations des phases de Vénus suggèrent que la planète ne tourne pas autour de la Terre, mais bien du Soleil, et confirment ses intuitions en faveur du système héliocentrique de Copernic (▸ 1543, p. 112). Galilée développe ensuite des arguments subtils en faveur des thèses coperniciennes, se heurtant une nouvelle fois à l'opposition d'influents philosophes aristotéliciens et théologiens, jusqu'à sa condamnation par l'Inquisition.

La Lune montre son vrai visage

Les observations de la Lune faites par Galilée montrent des accidents de terrain qui ressemblent à des montagnes et à des cratères. Cette vision contredit l'image aristotélicienne d'un ciel immuable et parfait, composé de corps lisses et cristallins. Pour Galilée, qui a déjà observé l'apparition d'une nouvelle étoile dans le ciel, la supernova de 1604, la cosmologie d'Aristote n'est résolument plus tenable.

Image de la Lune extraite de *Sidereus Nuncius*, Galileo Galilei, 1610.

Le procès de Galilée

L'Europe du début du XVII^e^ siècle est bouleversée par des conflits politiques et religieux, sur fond d'expansion du protestantisme. Le soutien de Galilée au système copernicien est perçu par l'Église catholique comme une attaque des dogmes, basé sur l'interprétation littérale de la Bible où la Terre est décrite comme immobile. Un premier avertissement contre la diffusion de la théorie de Copernic est promulgué en 1616. Galilée reste discret jusqu'au moment où son ami Maffeo Barberini (1568-1644) est élu pape sous le nom d'Urbain VIII et lui donne l'espoir d'une ouverture de l'Église à ses thèses. Toutefois, après la publication du *Dialogue sur les deux systèmes du monde* (1632), dans lequel Galilée confronte les systèmes copernicien et aristotélico-ptolémaïque, l'Inquisition lui intente un procès. En 1633, il est condamné à la réclusion à perpétuité et doit abjurer l'héliocentrisme (▶ 1633).

« N'importe qui pourra comprendre que la Lune n'est nullement revêtue d'une surface lisse et parfaitement polie, mais bien d'une surface accidentée et inégale, et qu'elle est, comme la face de la Terre elle-même, couverte de tous côtés d'énormes protubérances, de creux profonds, et de sinuosités… »

Galileo Galilei, *Sidereus Nuncius*, 1610.

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1644 Invention du baromètre par Torricelli

1672 Décomposition prismatique de la lumière blanche par Newton

Échelle thermométrique de Celsius 1742

1751 Découverte de la nature électrique des éclairs par Franklin

Découverte de l'hydrogène par Cavendish 1766

1614 John Napier invente les logarithmes

John Napier
1550-1617

Un aristocrate écossais aide les astronomes dans leurs calculs en inventant une méthode qui permet de transformer les produits en sommes. Il lui donne le nom de « règle des logarithmes ».

Des calculs… astronomiques

À la Renaissance, les astronomes font face à des calculs de plus en plus longs. Lorsque Nicolas Copernic introduit son modèle héliocentrique pour prédire de façon plus fiable les mouvements apparents du Soleil, de la Lune et des planètes (▸ 1543 p. 112), l'astronome allemand Érasme Reinhold (1511-1553) doit, après sa mort, consacrer sept années au calcul et à la construction des premières tables astronomiques basées sur ce nouveau modèle. Puis au début du XVII^e^ siècle, le célèbre astronome Johannes Kepler (1571-1630), ayant déterminé que les planètes suivent en réalité des orbites elliptiques, décide de tout recalculer encore une fois : cela lui demande vingt-six ans d'un labeur acharné…

Des loisirs fructueux

Au milieu de cet effort, Kepler met la main sur un petit livre en latin, paru en 1614, dont on peut traduire le titre par *La merveilleuse règle des logarithmes*. Il y trouve une méthode qui permet de remplacer les multiplications, longues à effectuer et propices aux erreurs, par de simples additions. L'auteur de cette méthode est un aristocrate écossais qui se nomme John Napier (aussi connu sous le nom de Neper). Gestionnaire de larges domaines, il n'a pas beaucoup de temps à consacrer aux mathématiques, qui ne sont guère pour lui qu'un loisir. Aussi, s'intéresse-t-il à diverses méthodes permettant d'accélérer les calculs, dont les célèbres logarithmes.

Vers une simplification des calculs

Quand, le 28 juin 1619, Kepler écrit à Napier pour le remercier de cette utile invention, ce dernier est déjà mort. Henry Briggs (1561-1630), professeur de mathématiques à Oxford, a eu, lui, la chance de discuter avec Napier et de lui parler d'une idée pour simplifier la présentation de son invention. Jusqu'à l'apparition des calculateurs modernes, la définition du logarithme décimal proposée par Briggs va s'appliquer partout où les calculs sont longs et fastidieux.

Des bâtonnets pour calculer

C'est dans une publication de 1617 que John Napier présente les bâtonnets qu'il a imaginés pour faciliter les calculs. En plaçant les bâtonnets les uns à côté des autres, les multiplications se réduisent à de simples additions. Cet outil se répand rapidement dans toute l'Europe. C'est néanmoins la méthode des logarithmes, plus sophistiquée, qui aura la préférence des savants.

Boîte de bâtonnets de Napier à quatre faces, 1617-1799.

« La découverte des logarithmes [...], en réduisant à quelques heures le travail de plusieurs mois, double, si l'on peut ainsi dire, la vie des astronomes, et leur épargne les erreurs et les dégoûts inséparables de leurs longs calculs. »

Pierre-Simon Laplace, *Cours de l'École normale*, 28 janvier 1795.

En base 10, c'est plus simple

Le mot *logarithme* est composé de deux racines grecques : *logos* qui signifie fraction, et *arithmos* nombre entier. Napier forge ce mot pour mettre en relation deux séries de valeurs permettant de transformer les multiplications en additions. Ainsi, à un produit d'éléments appartenant à la première série correspond une somme d'éléments de la seconde. En adoptant une représentation en base 10, Briggs en simplifie considérablement la compréhension. Pour les puissances de 10, le logarithme correspond alors simplement au nombre de zéros dans son expression numérique. Ainsi, le logarithme de 100 est 2, celui de 1 000, 3, et ainsi de suite. Pour les nombres compris entre 100 et 1000, le logarithme est un nombre réel entre 2 et 3 dont la valeur, plus difficile à calculer, peut être trouvée en pratique dans des tables numériques.

1620

Un chancelier anglais imagine la science du futur

Francis Bacon
1561-1626

Francis Bacon, homme politique de l'époque élisabéthaine, prophétise l'avènement d'une nouvelle science, fondée sur l'observation et l'expérience. D'après lui, ce nouveau savoir permettra aux hommes de maîtriser leur environnement naturel.

Un chancelier philosophe

Élu pour la première fois au Parlement de Londres en 1581, Francis Bacon, juriste de formation, se hisse dans les hautes sphères politiques britanniques avec l'appui du comte d'Essex, favori de la reine Élisabeth. Il devient proche conseiller de la reine, puis chancelier de son successeur, le roi Jacques I[er].

Homme politique redoutable, Bacon est aussi philosophe et publie plusieurs livres critiquant l'aristotélisme pendant les deux premières décennies du XVII[e] siècle. Son ouvrage le plus connu est l'*Instauratio Magna*, publié en 1620, qui propose une nouvelle façon d'accéder à la vérité.

De la déduction à l'induction

> *« La science doit être tirée de la lumière de la nature, elle ne doit pas être retirée de l'obscurité et de l'antiquité. »*
>
> Francis Bacon, *Instauratio Magna*, 1620.

Par contraste avec la méthode aristotélicienne qui se fonde sur la déduction pour aller d'une vérité générale à des cas particuliers, Bacon propose de refonder les savoirs sur la base d'une nouvelle méthode, l'induction.

Il s'agit de collecter des faits à propos de la nature, de les classer, de les vérifier en effectuant des expériences et d'en tirer des « axiomes » généraux, ce que nous appelons des lois scientifiques. Bacon théorise ainsi une méthode qui sera utilisée par de nombreux acteurs de la révolution scientifique au XVII[e] siècle.

La science baconienne en héritage

La méthode inductive de Bacon sera tout particulièrement reprise par Robert Boyle (▸ 1659), Robert Hooke (1635-1703) et certains membres de la Société royale de Londres. Cette société, fondée en 1660, réalise des expériences, publie des résultats scientifiques et devient un des foyers les plus importants de la nouvelle science en Europe. Jusqu'à la fin du XIX[e] siècle, Bacon reste la principale référence de la Société royale et, plus généralement, des tenants de la science empirique.

À la conquête du savoir

Cette gravure, qui apparaît en première page de l'*Instauratio Magna* de Bacon, montre un navire franchissant les colonnes d'Hercule. Ces piliers, qui bordent le détroit de Gibraltar, symbolisent, à cette époque, les limites du savoir humain. Bacon invite ainsi ses lecteurs à suivre l'exemple de ce navire, à découvrir des mondes inconnus et à enrichir les connaissances sur la nature.

Frontispice de l'*Instauratio Magna*, 1620.

La Nouvelle Atlantide

Dans *La Nouvelle Atlantide*, un ouvrage paru en 1627, peu après sa mort, Bacon décrit une société utopique centrée sur la « Maison de Salomon ». Les membres de cet institut de recherche scientifique et technique y font des expériences scientifiques et en tirent des « axiomes ». Sur la base de ce savoir, ils conçoivent et développent des matériaux et techniques utiles aux hommes. D'après Bacon, cette nouvelle approche scientifique permettra aux hommes de contrôler la nature. Grâce à elle, ils innoveront et développeront des technologies qui leur assureront la maîtrise du monde.

« Beaucoup passeront et la science augmentera. »

Frontispice de l'*Instauratio Magna*, 1620.

1640 | 1660 | 1680 | 1700 | 1720 | 1740 | 1760 | 1780

1637 Descartes, *Discours de la méthode*

1657 Horloge de Huygens

1690 Machine à vapeur de Papin

1739 Hume, *Traité de la nature humaine*

1751
Parution du premier tome de l'*Encyclopédie*

1626

Des missionnaires font découvrir la lunette aux Chinois

Johann Adam Schall von Bell
1592-1666

Il a fallu moins de vingt ans aux savants européens pour rendre accessibles à leurs collègues asiatiques les découvertes faites par Galilée à l'aide de sa lunette. Dès 1626, le jésuite Adam Schall von Bell rédige en chinois un traité détaillé sur le sujet.

Les nouvelles vont vite !

Dès 1615, les lettrés chinois peuvent avoir accès aux observations astronomiques de Galilée (▸ 1610). Dans *Explication de la sphère céleste*, le jésuite portugais Manuel Dias (1554-1659) montre comment l'astronome italien, « attristé par la faiblesse de ses yeux », a conçu la lunette et pu voir Vénus aussi grosse que la Lune. Mais Dias n'est pas astronome, et son ouvrage ne permet guère de comprendre le fonctionnement de cet étrange instrument.

Expliquer la lunette aux Chinois

Trois ans plus tard, en 1618, une lunette astronomique franchit l'océan dans les bagages de Johann Schreck (1576-1630). Élève de Galilée, ce père jésuite s'est procuré l'instrument pour l'offrir à l'empereur de Chine. Sur le même bateau se trouve Adam Schall von Bell. Astronome et mathématicien, ce jeune jésuite, qui a eu l'occasion de rencontrer Galilée, a en tête de partager avec les Chinois le savoir scientifique et technique de l'Occident.

Comme le missionnaire Matteo Ricci (1552-1610) avant lui, il sait que son expertise astronomique peut intéresser les autorités impériales (▸ 1280). C'est ainsi qu'en 1626, sous le nom de Tang Ruowang, Schall publie un livre sur la lunette où il décrit les découvertes de Galilée sur le Soleil, la Lune, Vénus, Jupiter, Saturne et la Voie lactée. Il y explique aussi les principes optiques de l'instrument.

Une grande divergence

Schall et d'autres missionnaires, avec l'aide de collaborateurs chinois, publient plus de trente-six livres en mandarin sur les sciences et techniques. Ils traduisent par exemple les grands traités d'ingénieurs occidentaux comme celui d'Agricola sur les mines (▸ 1556).

Malgré un degré d'avancement scientifique et technique remarquable, la Chine ne connaîtra pas le même décollage industriel que l'Angleterre où la révolution industrielle européenne débute bientôt. À ce jour, aucun consensus n'existe parmi les historiens pour expliquer simplement cette grande divergence.

Le mandarin allemand

Chargé en 1630 par l'empereur de Chine de réformer le calendrier, Schall connaît une ascension remarquable dans l'administration chinoise. Sous l'empereur mandchou Shunzhi, son élève, il devient directeur du Bureau impérial d'astronomie. En 1651, il est nommé grand maître du conseil. Mais son succès attire la jalousie d'autres astronomes qui, après la mort de Shunzhi, l'accusent de trahison. Schall est soumis à la torture, mais finit par être réhabilité. Affaibli par ses blessures, il meurt peu après.

Le père Schall von Bell dans *China Monumentis*, Athanasius Kircher, 1668.

Mission sciences

À l'époque moderne, les missions étrangères en Extrême Orient participent à une véritable mondialisation des savoirs. L'ordre jésuite, fondé en 1540, y prend une part prépondérante. L'un de ses membres, Matteo Ricci, réussit à rencontrer l'empereur grâce à ses connaissances astronomiques. Avec un collaborateur chinois converti au catholicisme, Xu Guangqui, il produit, en 1607, la première traduction en mandarin des *Éléments* d'Euclide (► – 300). Ferdinand Verbiest (1623-1688), collaborateur de Schall, fabrique en 1672 une machine à vapeur pour la cour de Pékin. Inversement, les missionnaires jésuites vont contribuer à diffuser les connaissances chinoises en Occident.

1628

Harvey dissipe les croyances sur la circulation sanguine

William Harvey
1578-1657

Un médecin anglais démontre, de façon expérimentale, que le sang circule en circuit fermé dans l'ensemble du corps des mammifères, et décrit en détail la circulation sanguine. Dès lors, plusieurs siècles de croyances volent en éclats.

Le sang fait son chemin

C'est le médecin romain Galien au IIe siècle qui, le premier, fait référence à la circulation sanguine (▸ dossier, p. 56-57). Pour lui, c'est le foie qui produit le sang à partir des aliments, un sang noir et épais qui nourrit le corps. Arrivé au cœur, le sang devient rouge vif et fluide par l'apport d'un esprit vital et se déplace vers les extrémités du corps avant de disparaître.

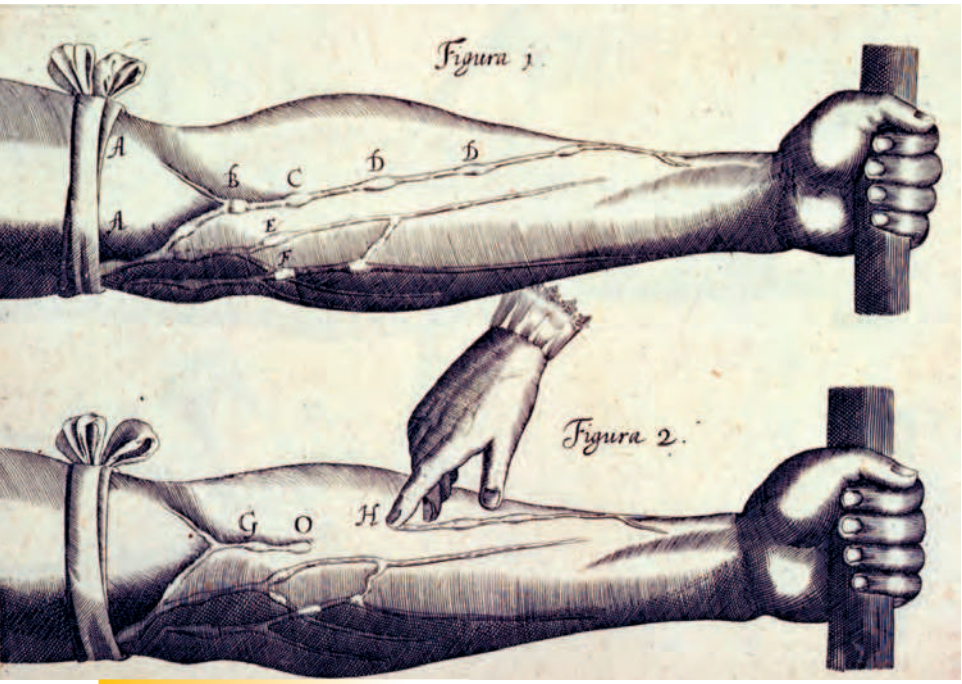
Cette conception perdure jusqu'au XIIIe siècle, jusqu'à ce que Ibn al-Nafis (1208-1288), médecin au Caire, décrive la « petite circulation », un circuit clos qui relie le cœur et les poumons. À la Renaissance, les découvertes de médecins anatomistes, comme l'Espagnol Miguel Servet qui dissèque auprès de Vésale (▸ 1543, p. 114) ou l'Italien Realdo Colombo, confirment l'existence de cette boucle où le sang noir s'oxygène et se transforme en sang rouge en passant par les poumons.

Une circulation en circuit fermé

En 1628, dans *L'Anatomie du mouvement du cœur et du sang chez les animaux*, Harvey démontre l'existence d'une deuxième boucle, celle de la « grande circulation », reliant le cœur au reste du corps en circuit fermé. Il mesure pour cela le volume de sang éjecté par le cœur lors d'une contraction et en déduit que la quantité de liquide expulsée par jour est trop importante pour provenir de l'alimentation. Le recyclage du sang dans un circuit clos semble plus crédible, hypothèse qu'il confirme par l'expérience du garrot.

Harvey insiste sur le fait que la méthode expérimentale mise en œuvre a le même caractère de démonstration que le raisonnement mathématique. Cependant, sa découverte, capitale, sur la circulation sanguine est accueillie avec scepticisme par la communauté médicale, tributaire de la pensée galénique. Elle ne sera admise qu'après sa mort.

> *« Le sang est animé d'un mouvement circulaire qui l'emporte dans une agitation perpétuelle, c'est là la fonction du cœur qui est la cause unique de tous ces mouvements. »*
>
> William Harvey, *Anatomie du mouvement du cœur et du sang chez les animaux*, 1628.



L'expérience du garrot

En posant un garrot à la base du bras, plus ou moins lâche, William Harvey observe le comportement des veines et des artères. Il démontre alors avec certitude que le sang circule des organes vers le cœur *via* le réseau veineux, et du cœur vers les organes *via* le réseau artériel. Par ailleurs, Harvey a l'intuition, sans pouvoir le démontrer, que le sang passe des artères aux veines par de fines connexions. Ces dernières, appelées capillaires, seront mises en évidence en 1661 par le microscopiste italien Marcello Malpighi.

Gravure illustrant la théorie de la circulation du sang de William Harvey, 1628-1639.

« Le cœur des animaux est le principe de la vie, le directeur de toutes les parties, le soleil du microcosme, l'organe d'où dépendent l'existence, la vigueur et la force de l'être. »

William Harvey, *Anatomie du mouvement du cœur et du sang chez les animaux*, 1628.

De la saignée à la transfusion

Pour Hippocrate et Galien, dans l'Antiquité, le sang est l'humeur responsable du caractère sanguin, passionné et jovial. Il entretient la chaleur du corps, raison pour laquelle la saignée est la méthode employée pour faire baisser les fièvres. Plus tard, il n'est plus question d'éliminer mais d'injecter du sang pour soigner. Une première transfusion sanguine, d'un mouton à un être humain, est réalisée en 1667 par le médecin français Jean-Baptiste Denis (1643-1704), mais le patient meurt quelques jours plus tard. Le transfert entre humains est beaucoup plus tardif et date du début du XIXe siècle. Avec la découverte des groupes sanguins ABO au début du XXe siècle, la transfusion devient une procédure sûre, et sa pratique se répand rapidement.

1640 | 1660 | 1680 | 1700 | 1720 | 1740 | 1760 | 1780

1635 Fondation du Jardin du roi à Paris

1669 Explication de la fossilisation par Steno

1675 Découverte des micro-organismes par Van Leeuwenhoek

Inoculation contre la variole à Constantinople 1714

1735 Linné, *Système de la nature*

1749 Premier tome de l'*Histoire naturelle* de Buffon

1633

Descartes imagine un nouveau Monde

René Descartes
1596-1650

René Descartes réagit à la condamnation de Galilée par l'autocensure. Pourtant, la nouvelle vision du monde qu'il propose voit le jour une décennie plus tard et encourage les philosophes à expliquer les phénomènes naturels à l'aide de modèles mécaniques.

Une condamnation qui fait peur

En juin 1633, Galilée doit abjurer, face au tribunal de l'Inquisition de Rome, l'idée copernicienne d'une Terre qui tourne autour du Soleil (▸ 1610). Condamné à la réclusion à perpétuité, on lui interdit de publier des ouvrages sur Copernic ou d'enseigner sa doctrine jugée « hérétique ».

Lorsque René Descartes – qui défend les idées de Copernic – apprend la nouvelle, il décide de ne pas publier son *Système du Monde*. Cet ouvrage propose en effet une révision complète de la physique et une version modifiée du système copernicien, dans lequel il inclut un nombre infini de systèmes solaires.

Descartes préfère publier, en 1637, des essais moins polémiques sur la géométrie, la dioptrique et la météorologie, auxquels il rajoute une introduction qui deviendra célèbre : le *Discours de la méthode*.

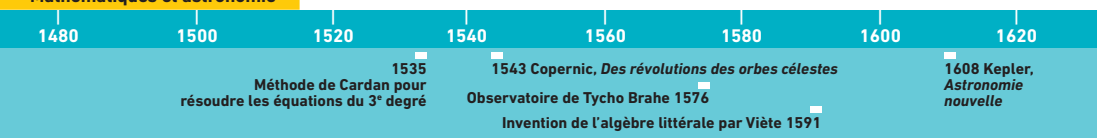
Les principes de la philosophie

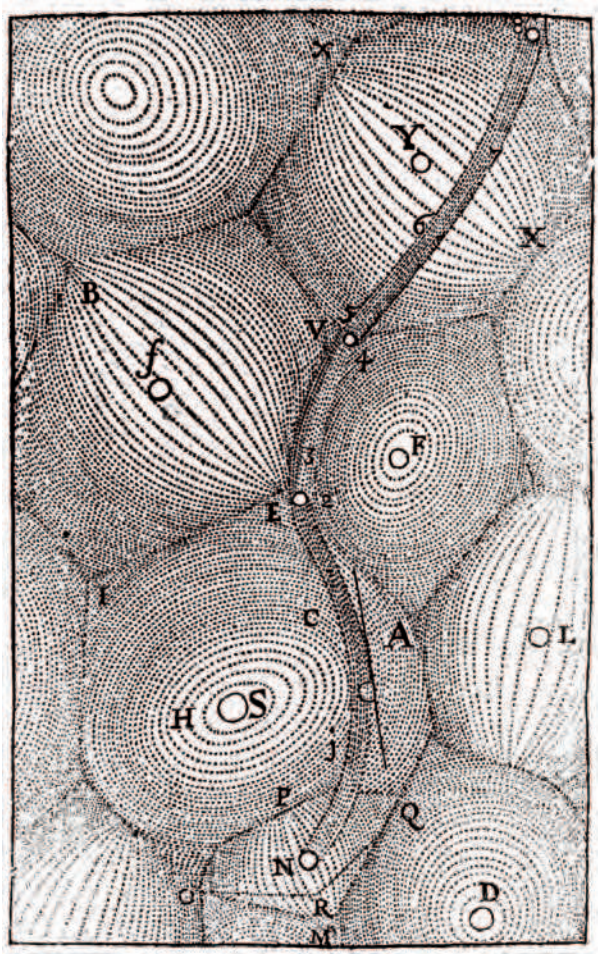
Une bonne partie des idées du *Système du Monde* de Descartes est toutefois reprise dans les *Principes de la philosophie*, un manuel universitaire publié en latin en 1644. Sans prendre parti sur le mouvement de la Terre, il propose la première présentation complète de la philosophie mécanique.

Dans son livre, Descartes postule que le monde naturel est régi par deux principes : la matière et le mouvement. Tout phénomène naturel – comme les orbites des planètes ou le magnétisme – peut ainsi être expliqué comme résultant du mouvement de particules, obéissant à la loi d'inertie, et des règles de collision.

Cet ouvrage a une grande influence sur la philosophie naturelle française, et inspire des traités populaires d'astronomie comme celui de Bernard Le Bovier de Fontenelle (1657-1757). Les thèses mécanicistes de Descartes vont s'effacer quelques années plus tard devant les théories d'Isaac Newton, qui écrit ses *Principia mathematica* comme une réfutation de la vision cartésienne (▸ 1687).

Mathématiques et astronomie





L'Univers selon Descartes

Descartes propose une explication mécanique de la stabilité des orbites des planètes avec sa théorie des tourbillons. Selon cette hypothèse, il existe une matière subtile qui tourne en cercles autour de chaque étoile, et emporte avec elle les planètes comme de simples brindilles dans un vortex.

Les tourbillons de Descartes, *Principes de la philosophie*, 1644.

« Je sais bien que les bêtes font beaucoup de choses mieux que nous, mais je ne m'en étonne pas ; car cela même sert à prouver qu'elles agissent naturellement et par ressorts, ainsi qu'une horloge, laquelle montre bien mieux l'heure qu'il est, que notre jugement ne nous l'enseigne. »

René Descartes, Lettre au marquis de Newcastle, 23 novembre 1646.

Le monde comme une horloge

Des images mécaniques dominent la philosophie naturelle du XVII^e^ siècle. Le cosmos est alors conçu comme une horloge, et il appartient aux savants ou aux philosophes de révéler le mécanisme caché qui le fait fonctionner. Pour Descartes, tout phénomène naturel peut s'expliquer en faisant l'analogie avec un mécanisme simple et familier. Si le mouvement des planètes peut être comparé à celui de brindilles dans un vortex, celui des muscles et des tendons peut être assimilé à celui de ressorts, et la respiration peut être rapprochée du mouvement continu du moulin ou de l'horloge. Cette vision cartésienne exclut les miracles mais présuppose l'existence d'un Dieu qui, à la manière d'un maître horloger, aurait créé et mis en marche un univers composé de subtils mécanismes.

1644

Torricelli n'a pas horreur du vide

Evangelista Torricelli
1608-1647

En 1644, Torricelli met en évidence la pression exercée par l'air grâce à une expérience avec du mercure. Pour cela, il doit admettre l'existence du vide, qui fait l'objet d'un refus dogmatique depuis l'Antiquité.

Et les fontainiers pompaient

Malgré l'usage de pompes aspirantes de qualité, les fontainiers de Florence n'arrivent pas à élever l'eau de l'Arno à plus de 10,33 mètres de hauteur. Consulté sur la question en 1638, Galilée (▸ 1610) explique alors la limite de la hauteur de la colonne d'eau dans la pompe par une « résistance à la rupture » du vide.

Ainsi, Galilée remet partiellement en cause l'inexistence du vide avancée par Aristote : l'horreur qu'éprouve la nature envers le vide serait limitée, d'où la hauteur limitée de la colonne d'eau. La question technique devient une question scientifique.

Une atmosphère pesante

Les disciples de Galilée ne se contentent pas de l'interprétation de leur maître. Jean-Baptiste Baliani (1582-1666) émet l'idée qu'une pression exercée par l'air limite la montée de l'eau dans les pompes. Des expériences sont alors réalisées pour éprouver le poids de l'air. Evangelista Torricelli, autre disciple de Galilée, reprend l'idée de Baliani en 1644. Il prend un long tube de verre qu'il remplit de mercure, 13,6 fois plus dense que l'eau, et qu'il retourne dans une cuve de mercure. Le mercure reste dans le tube et s'équilibre au-dessus de la surface de la cuve (76 cm).

> *« Nous vivons au fond d'un océan de l'élément air dont on sait, par des expériences indubitables, qu'il est pesant [...]. »*
>
> Lettre de Torricelli à Michelangelo Ricci, 1644.

De l'air au vide

Torricelli affirme, par son expérience, avoir testé l'hypothèse du poids de l'air : c'est bien la pression de l'air extérieur à la colonne qui appuie sur le mercure et cause sa suspension. Gradué, le tube mesure le poids de l'air. Le baromètre est inventé !

Mais que contient réellement cet espace libre au sommet du tube ? Est-il vide ou comporte-t-il un effluve inconnu ? En effet, l'expérience de Torricelli ne prouve pas l'existence du vide. La communauté savante du XVII^e^ siècle se mobilise dès lors sur la question, sans succès. Roberval suggère que, pour le savoir, il faudrait y glisser un oiseau et voir s'il peut voler…

Sciences expérimentales

1480 — 1500 — 1520 — 1540 — 1560 — 1580 — 1600 — 1620

1516 Arrivée de Léonard de Vinci en France

1537 Développement de la mécanique de l'artillerie par Tartaglia

1600 Gilbert, *De l'aimant*

Galilée, *Messager céleste* 1610

Énoncé de la loi de la réfraction par Snell 1628

Perrier prend l'air au puy de Dôme

Blaise Pascal (1623-1662) accepte d'emblée l'idée que l'air possède un poids et émet l'hypothèse que « les liqueurs pèsent selon leur hauteur ». Le 15 novembre 1647, il confie à son beau-frère, Florin Perrier, la mesure de la pression de l'air au pied et au sommet du puy de Dôme grâce à un tube de mercure. Au sommet, la colonne de mercure est moins haute de 9 cm. L'hypothèse de Pascal est vérifiée : la pression de l'air diminue avec l'altitude.

Périer mesurant la hauteur du tube de Torricelli au sommet du puy de Dôme, *Les Merveilles de la science* de Louis Figuier, 1867-1891.

La querelle du vide

Les philosophes grecs comme Aristote sont convaincus que la nature a horreur du vide. Cette affirmation de principe est reprise par le dogme chrétien selon lequel Dieu est partout et ne peut, dans sa perfection, supporter la vacuité. Vide et non-être étant associés, l'impossibilité du non-être implique l'impossibilité du vide. « Vacuistes » et « plénistes » s'affrontent à longueur de traités au XVII^e^ siècle, alors qu'il est impossible de prouver l'existence du vide en haut du tube barométrique. Malgré cela, la possibilité du vide prend corps, notamment avec la pompe à air de Boyle (► 1659) et la mort de petits animaux qui prouve la raréfaction de l'air. Le concept de vide rend alors plausible la conception d'un espace indépendant de la matière.

1644 Principe du baromètre

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

Échelle thermométrique de Celsius 1742

1751 Découverte de la nature électrique des éclairs par Franklin

1672 Décomposition prismatique de la lumière blanche par Newton

Découverte de l'hydrogène par Cavendish 1766

1655

Un médecin danois expose la nature du monde

Ole Worm
1588-1654

Dans son cabinet, le médecin danois Ole Worm réunit une riche collection d'objets d'histoire naturelle. Héritière des cabinets de curiosités de la Renaissance, sa collection annonce celles de la période des Lumières.

Un savant plein de ressources

Médecin du roi Christian IV de Danemark, Ole Worm s'intéresse aux sciences et aux lettres. Fortement impliqué dans l'enseignement, il réunit une riche collection d'objets – animaux naturalisés, squelettes, minéraux, coraux, coquillages, carapaces, cornes, outils, objets ethnographiques, etc. – dans le but de représenter les différentes productions de l'homme et de la nature. Son cabinet pédagogique anticipe ainsi les collections d'études propres à la période des Lumières (▸ 1739).

La fin des mythes et des légendes

Worm est l'un des premiers naturalistes à construire une connaissance empirique fondée sur l'observation et la description. Grâce à sa démarche, il montre que la légendaire corne de licorne n'est autre que la dent hypertrophiée du narval, que les oiseaux du paradis ne vivent pas éternellement en vol car ils possèdent deux pattes munies de doigts, ou encore que les lemmings, petits rongeurs de l'Arctique, ne tombent pas du ciel avec les tempêtes de neige, mais naissent sur terre comme les rats et les souris.

Une nouvelle façon d'observer le monde

Avec Worm, le cabinet devient l'endroit où la nature est étudiée à travers ses productions. Ce que l'on voit et ce que l'on décrit priment sur ce que l'on peut lire dans certains ouvrages et que l'on peut mal interpréter. Pour lui, l'objet doit tout simplement être rattaché aux circonstances de sa collecte pour être compris.

Worm réunit en 1655 ses réflexions et ses gravures dans le *Museum Wormianum*, un catalogue publié à Leyde, aux Pays-Bas, un an après sa mort. Cette compilation témoigne alors de ces antres de la connaissance destinés aux élites urbaines cultivées et aux curieux, où l'on tente de saisir le monde tel qu'il est, avec l'ambition naissante d'un véritable projet encyclopédique (▸ dossier, p. 240-241).

Un cabinet curieux et bien rempli

Dans le cabinet de Ole Worm à Copenhague, les objets sont entassés sur les étagères et accrochés au plafond. Il ne reste pas le moindre espace vide. On y retrouve la classification des cabinets de curiosités de la Renaissance avec des objets d'histoire naturelle (*naturalia*), des objets créés ou modifiés par l'homme (*artificialia*), des instruments de mesure (*scientifica*) et des objets provenant de contrées lointaines (*exotica*).

Frontispice du *Museum Wormianum* de Ole Worm, 1655.

Les chambres des merveilles

Les cabinets de curiosités apparaissent en Italie, à la Renaissance. Ils constituent de véritables microcosmes où sont réunies, dans un espace réduit et intime, des productions de l'homme et de la nature. Ces premières collections d'histoire naturelle reflètent un engouement pour l'inédit, pour les spécimens rares et uniques. Des démonstrateurs animent ainsi des visites pour les couches aisées de la société (ecclésiastiques, apothicaires, médecins, académiciens, etc.), leur présentant fœtus monstrueux, bézoards en bocaux et autres merveilles. Ces objets sont expliqués à la lumière des connaissances de l'époque, encore largement influencées par les textes classiques, les croyances et les légendes.

« L'espace intime, préservé, jaloux d'un cabinet n'a de sens qu'en relation à un extérieur absolu. »

Patrick Mauriès, *Cabinets de curiosités*, 2002.

1655 Cabinet de curiosités de Worm

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1635 Fondation du Jardin du roi à Paris

1669 Explication de la fossilisation par Steno

1675 Découverte des micro-organismes par Van Leeuwenhoek

1714 Inoculation contre la variole à Constantinople

1735 Linné, *Système de la nature*

1749 Premier tome de l'*Histoire naturelle* de Buffon

1659

Boyle et Hooke expérimentent le vide

Robert Boyle
1627-1691

La machine pneumatique est un instrument emblématique de la révolution scientifique du XVII^e siècle. Améliorée par Robert Hooke et Robert Boyle, elle est à l'origine de nouvelles formes de production de savoirs scientifiques.

La machine pneumatique

Au XVII^e siècle, les expériences menées par des philosophes naturels, comme Galilée ou Evangelista Torricelli, aboutissent à la construction des premiers baromètres et stimulent le débat sur l'existence et la nature du vide (▸ 1644). En 1647, le philosophe et diplomate Otto von Guericke (1602-1686) construit la première « machine pneumatique », capable de raréfier l'air et donc de générer du vide dans un récipient, par l'action de pompes. Ces travaux inspirent le philosophe et théologien anglais Robert Boyle (1627-1691). En 1659, son assistant Robert Hooke (1635-1703) redessine complètement l'instrument en y ajoutant une sphère de verre.

Des expériences dans le vide

Boyle et Hooke observent ainsi les effets du vide sur différents objets en les introduisant dans le réceptacle en verre : des vessies remplies d'air se mettent à gonfler, des bougies s'éteignent, des animaux périssent et le son des cloches est réduit au silence. En revanche, les aimants continuent à attirer le fer et des corps chargés électriquement à se repousser… Les comptes rendus de ces expériences sont publiés par Boyle dans son livre *New Experiments Physico-Mechanical Touching the Spring of the Air and its Effects*, et la contribution de Hooke est pratiquement effacée.

Une nouvelle logique scientifique

Leurs expériences sont caractéristiques d'un nouveau mode de démonstration, basé sur l'expérience (▸ 1628). Il ne s'agit plus d'utiliser une théorie pour expliquer les phénomènes naturels, mais d'arriver à la connaissance à partir d'une situation artificielle contrôlée en laboratoire, qui, dès lors, devient le lieu central de la production des savoirs.

Cette nouvelle forme d'acquisition des savoirs est mise en pratique et développée dans les nouvelles académies scientifiques (▸ 1666, p. 138), comme la Société royale crée en 1660 et au sein de laquelle Hooke deviendra le premier démonstrateur.

Sciences expérimentales

1480 1500 1520 1540 1560 1580 1600 1620

1516 Arrivée de Léonard de Vinci en France

1537 Développement de la mécanique de l'artillerie par Tartaglia

1600 Gilbert, *De l'aimant*

Galilée, *Messager céleste* 1610

Énoncé de la loi de la réfraction par Snell 1628

Un instrument « philosophique »

L'émergence de la science moderne au XVII^e siècle entraîne la création de nouveaux types d'instruments scientifiques. Aux instruments « mathématiques » utilisés pour mesurer angles, distances, volumes ou poids, et « optiques » tels que les lunettes et les microscopes, s'ajoutent les instruments « philosophiques » comme le baromètre, la machine électrostatique ou la machine pneumatique qui produisent de nouveaux phénomènes, sujets à la discussion philosophique (► dossier, p. 166-167).

Joseph Wright of Derby, *Une expérience sur un oiseau dans une pompe à air*, 1768.

La loi des gaz

C'est en utilisant non pas une machine pneumatique mais des baromètres que Robert Boyle réalise les premières expériences contrôlées sur le rapport entre volume et pression d'un gaz. Cet exemple illustre le penchant de Boyle pour l'induction de lois à partir de l'expérience, inspirée par le chancelier Francis Bacon (► 1620). Son intérêt pour la découverte de lois dans la nature est aussi caractéristique de la théologie naturelle, qui cherche à montrer l'existence de Dieu en mettant en évidence la perfection et l'ordre de la nature et dont Boyle est un des principaux représentants.

1659 Perfectionnement de la machine pneumatique

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1644 Invention du baromètre par Torricelli

1672 Décomposition prismatique de la lumière blanche par Newton

Échelle thermométrique de Celsius 1742

Découverte de l'hydrogène par Cavendish 1766

1751 Découverte de la nature électrique des éclairs par Franklin

1666

Le roi réunit les savants dans sa bibliothèque

Au XVII^e siècle, la science n'est pas seulement philosophique, c'est aussi une activité pratique susceptible d'accroître la richesse d'une nation. En France, Louis XIV décide donc de financer une assemblée de savants, qui deviendra l'Académie des sciences.

De nouveaux lieux de sciences

En marge de l'université, les savants s'appuient de plus en plus sur le soutien de riches et puissants mécènes pour créer de nouveaux espaces de discussion et de pratiques collectives des sciences. En Italie, l'Accademia dei Lincei (académie des lynx) est fondée à Rome dès 1603. À Londres, des réunions ont lieu au Gresham College dès 1645. Ce cercle de savants est à l'origine de la Société royale, établie en 1660, qui commence bientôt à publier une revue scientifique, les *Philosophical Transactions*, encore active aujourd'hui.

Une Académie à la française

En France, l'Académie royale puise aussi ses origines dans des initiatives privées, comme les rencontres organisées par le mathématicien et philosophe Pierre Gassendi (1592-1655) dès 1648 au domicile du trésorier Henri de Montmort (v. 1600-1679).

Sous l'impulsion de Colbert, son principal ministre, Louis XIV décide de parrainer une assemblée de savants. Cette académie devient rapidement une institution d'État qui établit les priorités pour l'avancement des sciences et conseille le pouvoir royal. Nommés et rémunérés par le monarque, les académiciens siègent pour une première fois en 1666 dans la bibliothèque du roi, avant d'adopter des statuts officiels en 1699.

Des savoirs au service du pouvoir

À l'Académie des sciences, les savants peuvent compter sur un budget conséquent qui leur permet, entre autres, de faire construire l'Observatoire royal à Paris ou d'organiser des voyages d'exploration outre-mer (▸ 1736). Ils poursuivent des études susceptibles d'intéresser le pouvoir royal. L'astronomie y occupe une place centrale dans la recherche d'une méthode permettant de mesurer les longitudes (▸ dossier, p. 164-165). La lutte contre les famines et les épidémies qui ravagent encore périodiquement le royaume détermine également de nombreuses recherches sur la botanique et la pharmacie.

Sciences expérimentales

1480 | 1500 | 1520 | 1540 | 1560 | 1580 | 1600 | 1620

1516 Arrivée de Léonard de Vinci en France

1537 Développement de la mécanique de l'artillerie par Tartaglia

1600 Gilbert, *De l'aimant*

Galilée, *Messager céleste* 1610

Énoncé de la loi de la réfraction par Snell 1628

La cour des savants

Dans un décor dominé par l'Observatoire royal encore en chantier, des globes planétaires, cartes géographiques et squelettes d'animaux, Colbert présente au roi les savants de la nouvelle Académie royale des sciences. Parmi eux, on reconnaît le médecin et architecte Claude Perrault, l'astronome Giovanni Domenico Cassini, le botaniste Joseph de Tournefort et le mathématicien Gilles de Roberval.

Henri Testelin, *Colbert présentant à Louis XIV les membres de l'Académie royale des sciences*, seconde moitié du XVII[e] siècle.

« On ne détourna personne de suivre son génie ; on laissa à chacun la liberté d'apporter ses expériences ; on exhorta les plus laborieux et les plus industrieux à en faire, on les préféra à tout autre entretien. »

Discours de Sorbière à l'Académie de Montmort, le 3 avril 1663.

Une science au masculin

Reflet de la société et de l'histoire, l'Académie des sciences est restée pendant longtemps le privilège des hommes. En 1910, elle refuse d'élire Marie Curie qui, pourtant, a déjà été honorée d'un premier prix Nobel en 1903. Yvonne Choquet-Bruhat (née en 1923), mathématicienne et physicienne, est la première femme élue membre… en 1979. Avant elle, la chimiste Marguerite Perey (1909-1975), qui a découvert le francium, un élément chimique nommé ainsi en hommage à son pays, a été désignée correspondante en 1962. Aujourd'hui encore sur 271 académiciens, on ne compte guère que 31 femmes.

1666 Fondation de l'Académie des sciences

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1644 Invention du baromètre par Torricelli

1672 Décomposition prismatique de la lumière blanche par Newton

Échelle thermométrique de Celsius 1742

1751 Découverte de la nature électrique des éclairs par Franklin

Découverte de l'hydrogène par Cavendish 1766

1666

Marie Meurdrac publie *La Chymie charitable et facile*

Marie Meurdrac
vers 1610-1680

Une femme parle de chimie et s'adresse aux dames. Expliquant comment préparer médicaments et produits de beauté, Marie Meurdrac écrit en réalité un véritable traité de chimie expérimentale.

L'expérience d'une chimiste

On sait peu de chose de la vie de Marie Meurdrac. Native de Mandres-les-Roses, veuve assez jeune, elle a l'occasion de pratiquer la chimie et de faire ses propres expériences. Elle fabrique elle-même remèdes et onguents, qu'elle distribue parfois aux pauvres. Au début, Marie Meurdrac note, pour sa seule satisfaction, les connaissances acquises au prix d'un long travail. Puis, elle se laisse tenter par l'idée de les publier : le livre qui en résulte, *La Chymie facile et charitable en faveur des dames*, paraît en 1666.

> *« Eau qui blanchit le visage. Vous prendrez les coques de douze œufs frais, eau de pleurs de vigne une livre, sel commun une once, eau de fontaine demie livre : distillez le tout par la cornue au feu de sable. »*
>
> Marie Meurdrac, *La Chymie charitable et facile*, 1666.

Disciple de Paracelse

Contrairement à ce que peut laisser penser son titre, le livre de Meurdrac n'est pas une œuvre de vulgarisation. Inspiré de la chimie de Paracelse (▸ 1527), son traité ressemble à beaucoup d'autres livres de chimie de l'époque. Elle y discute d'abord les principes de cette science et les instruments dont on se sert au laboratoire, puis donne diverses préparations chimiques « véritables et expérimentées », réalisées à partir de produits végétaux, animaux ou métalliques. Elle donne plusieurs remèdes, tisanes, sirops, pilules, baumes et emplâtres, contre toutes sortes de maladies.

Conseils de beauté

Seule la sixième partie du livre, contenant des recettes de produits de beauté, est spécifiquement destinée aux femmes. Elle met en garde ses lectrices contre l'usage, fréquent à l'époque, de produits dangereux comme le mercure. L'ouvrage connaît un grand succès – il est réédité à plusieurs reprises, traduit en italien et en allemand – jusqu'au milieu du XVII^e siècle… puis est oublié. Aujourd'hui, son exemple nous rappelle que certaines femmes ont su vaincre les préjugés de leur époque et produire une œuvre scientifique.

Sciences expérimentales

1480 | 1500 | 1520 | 1540 | 1560 | 1580 | 1600 | 1620

1516 Arrivée de Léonard de Vinci en France

1537 Développement de la mécanique de l'artillerie par Tartaglia

1600 Gilbert, *De l'aimant*

Galilée, *Messager céleste* 1610

Énoncé de la loi de la réfraction par Snell 1628

« *Je m'objectais à moi-même que ce n'était pas la profession d'une femme d'enseigner ; qu'elle doit demeurer dans le silence, écouter et apprendre, sans témoigner qu'elle sait. [...] Je me flattais d'un autre côté [...] que les esprits n'ont point de sexe et que si ceux des femmes étaient cultivés comme ceux des hommes, et que l'on employât autant de temps et de dépense à les instruire, ils pourraient les égaler.* »

Marie Meurdrac, *La Chymie charitable et facile*, 1666.

Les instruments du chimiste

La science et la vérité sont souvent représentées par une jeune femme dont on doit soulever le voile pour découvrir ses secrets. Ici, dans la *Chymie des dames*, c'est l'autrice elle-même qui dévoile les instruments du chimiste : livres, béchers et fioles à col long. Dans son ouvrage, Marie Meurdrac ne divulgue pas tant les secrets de la nature que ceux des savants qui l'étudient. Elle montre que la science est à la portée de tous... et de toutes.

Frontispice de la troisième édition de la *Chymie facile*, 1687.

Les femmes savantes

Dès le début du XV^e^ siècle, dans la *Cité des dames*, la poétesse Christine de Pisan (v. 1356-1430) s'interroge sur l'égalité intellectuelle entre les hommes et les femmes. Pendant longtemps, certains s'opposent violemment à l'accès des femmes à une éducation scientifique sérieuse. Tandis que Molière, au XVII^e^ siècle, se moque des femmes savantes dans sa célèbre pièce de théâtre, l'écrivaine Jacquette Guillaume (XVII^e^ s.) rêve de rendre le savoir accessible aux femmes. Au siècle des Lumières, plusieurs femmes de sciences, à commencer par Émilie du Châtelet, traductrice de Newton (► 1756), marquent leur époque. Mais il faudra attendre Marie Curie (► 1898) pour voir l'une d'entre elles devenir professeure à la Sorbonne.

1666 Marie Meurdrac, *La Chymie charitable et facile*

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1644 Invention du baromètre par Torricelli

1672 Décomposition prismatique de la lumière blanche par Newton

Échelle thermométrique de Celsius 1742

Découverte de l'hydrogène par Cavendish 1766

1751 Découverte de la nature électrique des éclairs par Franklin

1684

La machine de Marly alimente les fontaines de Versailles

Rennequin Sualem
1645-1708

Le génie humain a toujours été sollicité pour construire les systèmes d'approvisionnement en eau des villes… voire des châteaux. C'est ainsi que pour satisfaire les plaisirs du roi de France, un charpentier illettré construit la plus grande pompe du monde.

Histoires d'eaux

Quand Louis XIV décide de faire construire un palais à Versailles, il souhaite y installer des fontaines à nulles autres pareilles. Mais le site choisi se trouve en hauteur, loin de toutes sources d'eau. Qu'à cela ne tienne ! Savants et ingénieurs sont sommés d'imaginer un ambitieux système hydraulique.

Auteur du projet du canal du Midi, l'entrepreneur Pierre-Paul Riquet (1609-1680) suggère de construire un canal entre la Loire et Versailles. Mais en 1674, la faisabilité du projet est remise en cause par l'astronome Jean Picard (1620-1682) de l'Académie des sciences (▸ 1666, p. 138), l'altitude du palais étant plus élevée que les points de captation possibles sur la Loire.

Un chantier pharaonique

En 1679, l'entrepreneur liégeois Arnold de Ville (1653-1722) propose un ambitieux système de pompes capable d'acheminer l'eau de la Seine, située environ cent cinquante mètres plus bas, jusqu'à Versailles. Pour ce projet, de Ville fait appel au charpentier et mécanicien wallon Rennequin Sualem, issu d'une famille d'ingénieurs des mines, qui maîtrisent les techniques de pompage (▸ 1556). La machine – qui aura nécessité 170 000 livres de cuivre, autant de plomb, 20 fois autant de fer, 100 fois autant de bois, 296 pompes et la paie de 1 800 hommes pendant 7 ans –, est inaugurée le 13 juin 1684, en présence du roi, enchanté.

Des résultats mitigés

Célèbre dans toute l'Europe, la pompe s'avère pourtant insuffisante. Alors que l'astronome Philippe La Hire (1640-1718) explore la possibilité de construire un canal de l'Eure à Versailles, son collègue Esprit Pézenas (1692-1776) souligne avec malice les défauts de la machine de Marly, qui ne pompe que la moitié du volume d'eau initialement prévu. Elle fonctionnera néanmoins pendant plus de 130 ans avant d'être remplacée par une série de nouvelles machines actionnées tour à tour par un moteur à vapeur, puis diesel et enfin électrique.

Philosophie, techniques et culture

1480 | 1500 | 1520 | 1540 | 1560 | 1580 | 1600 | 1620

1509 Fortifications de Padoue

1522 Premier tour du monde en bateau

1556 Agricola, *De re metallica*

1600 Exécution du copernicien Giordano Bruno, condamné par l'Inquisition

1620 Bacon, *Instauratio Magna*

Un torrent qui gravit la colline

Construite sur un bras de la Seine, la machine de Marly est composée de 14 roues de 10 mètres de diamètre. Ces roues actionnent des pistons, qui puisent l'eau et la transporte jusqu'à un premier réservoir à mi-hauteur, ainsi qu'une suite de balanciers qui actionnent les pompes permettant de faire passer l'eau par-dessus la colline, qui s'élève à environ 150 mètres au-dessus du fleuve. Au sommet, un aqueduc en maçonnerie conduit les eaux jusqu'au parc de Versailles, à 7 kilomètres de là.

Pierre-Denis Martin, *Vue de la machine de Marly et de l'aqueduc de Louvecienne*, 1727, Château de Versailles.

« Quand j'ai demandé au gros ambassadeur [de Thaïlande], ce qu'il avait trouvé de beau en France, il me dit qu'après les troupes du roi et ses places de guerre, c'était la machine de Marly. »

Abbé de Choisy, *Mémoires pour servir à l'histoire de Louis XIV*, 1727.

Des techniciens invisibles

La machine de Marly fait la fortune d'Arnold de Ville tandis que le charpentier illettré Rennequin Sualem en revendiquera toute sa vie la seule paternité, une question qui fait aujourd'hui encore débat. Son exemple nous rappelle qu'un grand nombre d'hommes et de femmes, tout en restant dans l'ombre, ont ainsi contribué à l'histoire des sciences et des techniques, parfois de manière décisive. L'historien des sciences Steve Shapin a souligné l'importance de ces « techniciens invisibles » dont il n'est pas toujours aisé de retrouver la trace. Encore aujourd'hui, combien d'innovateurs méconnus du grand public se cachent derrière chaque milliardaire de la Silicon Valley ?

1687

Newton pose les principes mathématiques de la physique

Sir Isaac Newton
1642-1727

Dans les *Principia mathematica*, Isaac Newton démontre que le mouvement des planètes autour du Soleil est lié à une force d'attraction à distance, la gravitation. Son approche mathématique des phénomènes naturels révolutionne alors la physique.

40 shillings pour une démonstration !

Comment expliquer la trajectoire des planètes autour du Soleil ? Une coquette somme de 40 shillings est promise à celui qui résoudra cet épineux problème mathématique. L'astronome Edmond Halley (1656-1742) rend alors visite à Isaac Newton, titulaire de la chaire de mathématiques au Trinity College de Cambridge, pour lui soumettre la question.

Newton se souvient avoir résolu ce problème mais ne retrouve pas ses notes… Il promet une réponse. Fin 1684, il envoie quelques pages à Halley intitulées *À propos du mouvement*. Son ami l'encourage à poursuivre ses travaux. Trois ans plus tard, en 1687, il publie les *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* ou *Principia mathematica*.

Et la gravitation fut !

Dans ce traité, Newton utilise la géométrie pour démontrer que la trajectoire elliptique des planètes, préalablement décrite par Johannes Kepler (1571-1630), met en jeu une force d'attraction inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare les planètes du Soleil. Cette force s'appelle la gravitation !

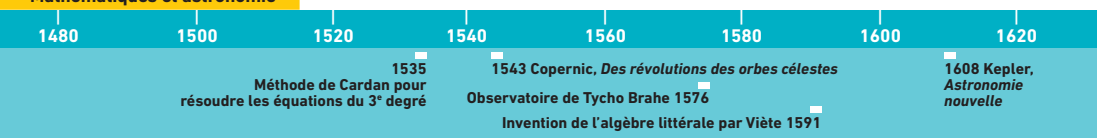
Pour la décrire, il pose le caractère « absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur », du temps et de l'espace, ainsi que trois lois universelles du mouvement. Dès lors, le mouvement de tout corps, sur Terre comme dans l'espace, devient calculable et prédictible (▸ 1814).

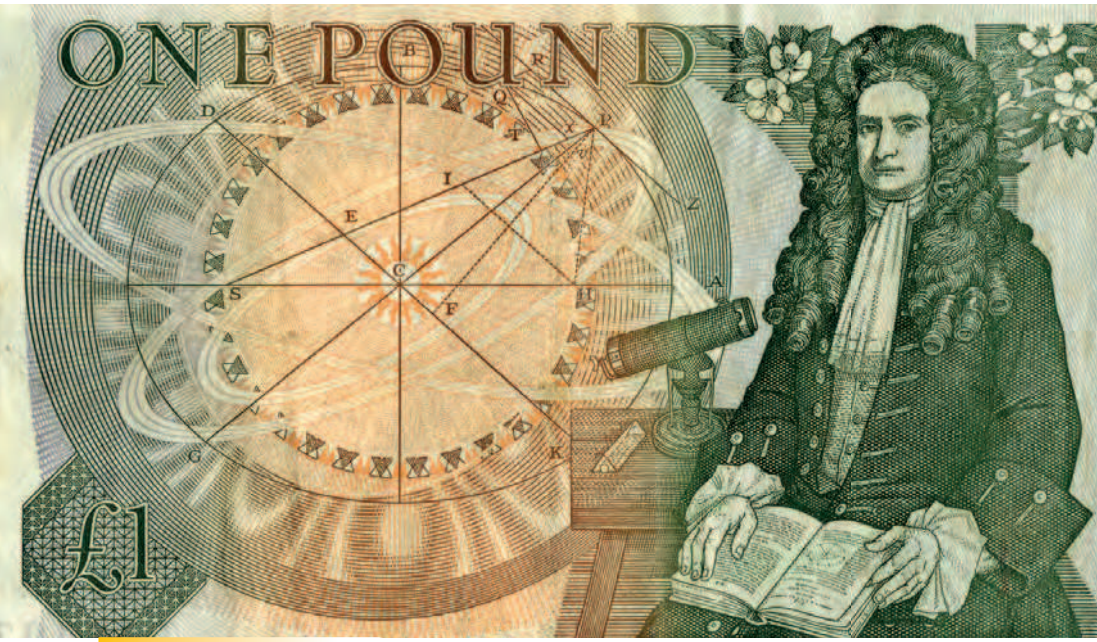
Des lois universelles

Mais Newton va plus loin et décrit, par ces mêmes principes mathématiques, « le système général du Monde ». Il explique par exemple le phénomène des marées et annonce que la Terre est légèrement aplatie aux pôles (▸ 1736).

La grande rigueur de ses démonstrations et la vérification des formules par des mesures astronomiques vont peu à peu convaincre de nombreux savants européens. La physique et la vision du monde newtoniennes ne seront ébranlées qu'au début du XX^e siècle, laissant place à la conception relativiste du monde d'Einstein (▸ 1905).

Mathématiques et astronomie





Le newtonianisme

Au XVIIIe siècle, le mouvement européen des Lumières, œuvrant pour le triomphe de la raison sur la croyance, va glorifier les travaux de Newton. L'empirisme et la rationalité qui s'y expriment sont des modèles de pensée. La vision newtonienne du monde devient la référence et les plus grands écrivains, comme Voltaire ou Alexander Pope (1688-1744), le louent.

Détail d'un billet d'une livre sterling représentant Newton, son télescope et la construction géométrique de sa démonstration, 1978.

Une force étrange

L'existence d'une force invisible qui lie les corps célestes entre eux, à distance, soulève des réticences aux XVIIe et XVIIIe siècles. Pourtant, dans les *Principia mathematica*, Newton se veut empiriste : il soutient qu'il « tire les propositions des phénomènes » naturels, et que seules les observations des positions des planètes et celles de la chute des corps guident ce qu'il expose. À propos de cette force de gravitation, « cette espèce d'esprit très subtil qui pénètre à travers tous les corps solides », il écrit : « Je ne forge point d'hypothèses. » Il n'en donne donc aucune explication métaphysique.

« La Nature et ses lois se cachaient dans la nuit. Dieu dit « que Newton soit ! » et tout devint lumière. »

Alexander Pope, *Épitaphe À l'intention d'Isaac Newton*, 1730.

Newton, *Principia mathematica* **1687**

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1637 Descartes, *Géométrie*

1642 Construction de la machine à calculer de Pascal

Euler, *Introduction à l'analyse infinitésimale* 1748

1761 et 1769 Passages de Vénus devant le Soleil

1696

L'Hospital analyse les infiniment petits

Guillaume de L'Hospital
1661-1704

Le savant français Guillaume de L'Hospital publie le premier traité fondé sur la notion d'« infiniment petit ». Il marque alors l'émergence d'une nouvelle branche des mathématiques : l'analyse.

Une méthode qui fait la différence

Des méthodes permettant de calculer les surfaces délimitées par des courbes sont connues depuis l'Antiquité grecque. Dans la première moitié du XVII^e siècle, Isaac Barrow, René Descartes (▸ 1633) et Pierre de Fermat y apportent des améliorations notables ou s'attaquent à l'étude du problème inverse, celui des tangentes.

Indépendamment l'un de l'autre, des années 1660 aux années 1690, Isaac Newton (▸ 1687) et Gottfried Wilhelm Leibniz inventent une nouvelle méthode de calcul plus générale, applicable à de très larges variétés de situations.

En 1696, initié par Jean Bernoulli, L'Hospital publie le premier traité récapitulant l'ensemble de la méthode de Leibniz, la méthode dite « des différences », qui s'appuie sur la manipulation de quantités infiniment petites. Il s'agit du traité *Analyse des infiniment petits pour l'intelligence des lignes courbes*.

Les infiniment petits sur le devant de la scène

La méthode leibnizienne, décrite par d'Alembert (▸ 1751) comme « une des plus belles et des plus fécondes de toutes les mathématiques », consiste à considérer des grandeurs infiniment petites comme les différences de quantités variables avec lesquelles on peut calculer plus facilement surfaces, volumes, vitesses, etc. Le traité de L'Hospital montre comment le calcul différentiel de Leibniz peut se généraliser. Destiné à populariser cette nouvelle approche, il s'imposera comme la référence pendant plusieurs décennies.

Les progrès réalisés dès le siècle suivant grâce au calcul différentiel et son pendant, le calcul intégral, sont impressionnants dans tout ce qui touche à la mathématisation des phénomènes physiques. Ils serviront par exemple à déterminer la trajectoire des boulets de canon (▸ 1745) et des comètes en astronomie, à calculer les marées, à établir les équations de la mécanique des solides et des fluides, mais aussi celles de la propagation du son, etc. Le calcul favorise également l'émergence d'une notion fondamentale en mathématiques, celle de « fonction », puis celle d'un nouveau domaine, celui de l'analyse.

Mathématiques et astronomie

1480 — 1500 — 1520 — 1540 — 1560 — 1580 — 1600 — 1620

1535 Méthode de Cardan pour résoudre les équations du 3^e degré

1543 Copernic, *Des révolutions des orbes célestes*

Observatoire de Tycho Brahe 1576

Invention de l'algèbre littérale par Viète 1591

1608 Kepler, *Astronomie nouvelle*

Le calcul différentiel en scène

Cette allégorie fait apparaître l'arrière-plan géométrique du calcul différentiel ainsi que les méthodes algébriques utilisées pour ce calcul, comme le fait l'ange en bas à gauche. On y voit aussi clairement les usages multiples auxquels il peut servir : la géographie représentée par le globe, l'optique par le miroir, l'astronomie par les cadrans solaires, etc. Curieusement, les applications en mécanique n'y figurent pas encore.

Illustration extraite de l'*Analyse des infiniment petits*, Guillaume de L'Hospital, 1696.

Des querelles à n'en plus finir

Dès 1697, une vive querelle oppose, à l'Académie des sciences, partisans et pourfendeurs du calcul différentiel et intégral. Ces derniers considèrent en effet que les infiniment petits sont mal définis et devraient être exclus des mathématiques. Quelques années plus tard, lorsque la méthode commence à être mieux acceptée, la question de sa paternité soulève d'acrimonieux débats entre les Anglais qui soutiennent les prétentions de Newton et les continentaux qui défendent Leibniz. Plus de trente ans plus tard, certaines idées de Newton peinent encore à se faire accepter des académiciens parisiens (▶ 1736).

« L'Analyse ordinaire ne traite que des grandeurs finies : celle-ci pénètre jusque dans l'infini même. Elle compare les différences infiniment petites des grandeurs finies [...], qui comparées avec des infiniment petits sont comme autant d'infinis. »

Guillaume de L'Hospital, *Analyse des infiniment petits pour l'intelligence des lignes courbes*, préface, 1696.

L'Hospital, *Analyse des infiniment petits* **1696**

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1637 Descartes, *Géométrie*

1642 Construction de la machine à calculer de Pascal

1687 Newton, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*

Euler, *Introduction à l'analyse infinitésimale* 1748

1761 et 1769 Passages de Vénus devant le Soleil

1735

Linné met de l'ordre dans la nature

Carl von Linné
1707-1778

Le naturaliste suédois Carl von Linné propose une méthode universelle pour nommer et classer le vivant : la taxinomie. Ce procédé permet de systématiser l'identification des espèces déjà connues et facilite la description de nouvelles espèces.

Un foisonnement d'espèces

À partir de la deuxième moitié du XVII^e^ siècle, les voyages d'exploration révèlent un monde où foisonnent les nouvelles espèces animales et végétales, qu'il faut d'abord nommer puis classer par rapport à celles déjà connues. Or, la diversité des langues et la prolifération de détails morphologiques utilisés pour décrire les espèces rendent la tâche ardue. C'est finalement Carl von Linné, professeur de botanique à l'université d'Uppsala, qui propose un procédé de classification simple et universel. Son système, présenté en 1735 dans la première édition de *Systema naturae*, se généralise à partir de 1758.

Un classement en poupées russes

Pour Linné, une classification reflète la hiérarchisation de la connaissance. À la façon des poupées russes, les espèces sont rangées en fonction de leur degré de ressemblance physique, du plus général au plus particulier, dans des « boîtes » qu'il appelle *taxons*. Il en définit six : règne, classe, ordre, genre, espèce et variété. Linné choisit successivement des caractères pour établir le classement. Ainsi, pour le règne végétal, il distingue d'abord les plantes avec ou sans fleur. Pour les premières, il place d'un côté les plantes avec fleurs hermaphrodites, de l'autre celles à sexes séparés. Ensuite, il suggère de les ranger d'après le nombre et la disposition des étamines.

À chacun son nom

Au moment d'attribuer un nom aux espèces, Linné propose des noms courts formés par deux termes issus du latin ou du grec. Le premier désigne le genre, le deuxième correspond à l'espèce. Ainsi le genre *Canis* regroupe des espèces bien connues comme le chien (*Canis familiaris*), le loup (*Canis lupus*) et le chacal (*Canis aureus*). Si certains naturalistes, comme Buffon (▸ 1739), s'opposent à l'utilisation de la taxinomie linnéenne, trop rigide et trop peu informative à leur goût, elle finit cependant par s'imposer.

Histoire naturelle et médecine

1480 — 1500 — 1520 — 1540 — 1560 — 1580 — 1600 — 1620

Théorie médicale de Paracelse 1527

1543 Vésale, *La Fabrique du corps humain*

Théâtre anatomique à Padoue 1594

Démonstration de la circulation sanguine par Harvey 1628

Un inventaire toujours en cours

Des commissions internationales de nomenclature attribuent toujours un nom binomial (genre et espèce) aux milliers de nouvelles espèces découvertes chaque année. Cependant, les classifications actuelles ne suivent plus la méthode de Linné. Elles sont basées sur la parenté phylogénétique entre espèces et prennent la forme d'arbres.

Planche de l'Herbier national du Muséum national d'Histoire naturelle de Paris.

« Pour s'entendre avec quelqu'un qui est absent, il faut bien convenir des noms qu'on donne aux objets dont on parle. »

Jean-Jacques Rousseau, *Lettres sur la botanique*, 1773.

Les « apôtres » de Linné

Hormis un séjour d'exploration dans les régions boréales, Linné n'est jamais sorti de son cabinet. Les quelque 8 000 espèces de plantes qu'il a décrites lui ont été ramenées de Chine, d'Arabie, de l'île de Java ou d'Afrique du Sud par ses disciples. Parmi eux, le naturaliste et botaniste suédois Daniel Solander (1733-1782) qui a rejoint la célèbre expédition du capitaine James Cook dans le Pacifique (► 1768). Ou encore Pehr Löfling (1729-1756), commissionné dans les colonies espagnoles en Amérique du Sud et mort à 27 ans au Venezuela. L'échange épistolaire entre Linné et ses « apôtres » est devenu fondamental à une période où les publications scientifiques sont très peu développées.

Linné, *Système de la nature* **1735**

1640 1660 1680 1700 1720 1740 1760 1780

1635 Fondation du Jardin du roi à Paris

1669 Explication de la fossilisation par Steno

1675 Découverte des micro-organismes par Van Leeuwenhoek

Inoculation contre la variole à Constantinople 1714

1749 Premier tome de l'*Histoire naturelle* de Buffon

1736

Des astronomes mesurent la Terre au bout du monde

Pierre Louis Moreau de Maupertuis
1698-1759

Pour régler une controverse scientifique sur la forme de la Terre, qui oppose les partisans de la physique de Newton à ceux de la philosophie de Descartes, la France finance deux expéditions géodésiques, au Pérou et en Scandinavie.

Controverse de taille à l'Académie

Les salons feutrés de l'Académie des sciences (▸ 1666, p. 138) sont régulièrement le théâtre de vives controverses. C'est le cas au début des années 1730 lorsque Pierre Louis Moreau de Maupertuis, mathématicien truculent qui revient de Londres, prend le parti de Newton (▸ 1687) et s'oppose aux idées de Descartes (▸ 1633), plus en vogue auprès des savants parisiens. Par la publication de son *Discours sur les différentes figures des astres*, le débat se cristallise sur la forme de la Terre. Alors que la famille Cassini, qui soutient la vision de Descartes, conclut à l'allongement du globe terrestre vers les pôles grâce à une série de mesures précises sur tout le territoire français, les calculs newtoniens prédisent au contraire un renflement au niveau de l'équateur.

> *« À Paris vous vous figurez la Terre faite comme un melon ; à Londres elle est aplatie des deux côtés. »*
>
> Voltaire, *Lettres philosophiques*, 1734.

Réponse du bout du monde

Pour trancher la question, deux expéditions sont financées par la France. La première, conduite par Charles Marie de La Condamine (1701-1774), part mesurer un arc de méridien au Pérou, tandis que la seconde, sous la direction de Maupertuis, fait de même entre la Suède et la Finlande.

Partie plus tard, en 1736, l'expédition nordique rentre la première, dès l'année suivante. Les aventures, y compris amoureuses, de Maupertuis et de son équipage chez les Samis égaient la bonne société parisienne. Et les conclusions scientifiques tranchent, sans appel, en faveur de l'hypothèse de Newton : la Terre est bien aplatie aux pôles.

Le triomphe de l'analyse

Lorsque les résultats de l'expédition du Pérou sont connus, un nouveau consensus sur la forme de la Terre est déjà établi. L'adoption de la physique newtonienne par les jeunes académiciens comme Jean Le Rond d'Alembert (▸ 1751) fait alors triompher l'analyse mathématique comme moyen privilégié de décrire, avec un succès certain, les phénomènes naturels.

Mathématiques et astronomie

1480 — 1500 — 1520 — 1540 — 1560 — 1580 — 1600 — 1620

1535 Méthode de Cardan pour résoudre les équations du 3e degré

1543 Copernic, *Des révolutions des orbes célestes*

Observatoire de Tycho Brahe 1576

Invention de l'algèbre littérale par Viète 1591

1608 Kepler, *Astronomie nouvelle*

Triangulation et mesure de précision

La controverse sur la forme de la Terre se déploie autour d'une science dédiée aux mesures de la surface du globe, la « géodésie ». Pour déterminer la longueur d'un méridien, il est nécessaire de transporter des instruments de visée dans des lieux élevés, visibles les uns des autres. L'opération consiste essentiellement en la mesure des angles de vastes triangles qui, par le biais de la trigonométrie, donne la longueur recherchée.

Cassini III, *La Méridienne vérifiée*, 1744.

« Les premières années de ma jeunesse ont été consacrées à cette carte qui comprend les limites et l'intérieur du Royaume, qui sera toujours le premier et peut-être le seul monument invariable de géographie. »

Cassini III, lettre à Turgot, vers 1774.

La carte de France

Âgé d'à peine vingt ans, César François Cassini de Thury, dit Cassini III (1714-1784), est impliqué dans la controverse de la figure de la Terre. Il prend part à de nouvelles campagnes de mesures en France qui, en fin de compte, confirment l'hypothèse newtonienne. Mais, contrairement à d'Alembert, Cassini III ne suit pas la voie d'une plus grande mathématisation. Il se lance dans la réalisation d'une carte détaillée de la France à l'échelle de 1/86 400, entreprise gigantesque et unique au monde à cette époque qui ne sera complétée qu'au XIXe siècle. Dans ce travail collectif d'une grande précision instrumentale s'exprime une autre forme de la modernité scientifique.

1739

Buffon cultive le Jardin du roi et le savoir

Georges Louis Leclerc, comte de Buffon
1707-1788

Georges Louis Leclerc, futur comte de Buffon, fait du Jardin du roi un lieu dédié à l'étude de la nature. Tout en travaillant à son *Histoire naturelle*, jusqu'à sa mort, il enrichit les collections royales et parraine de nombreux savants.

Un naturaliste à la cour

Originaire de Montbard en Bourgogne, Georges Louis Leclerc de Buffon est nommé intendant du Jardin et du Cabinet d'Histoire naturelle du roi en 1739, à Paris, l'année de ses trente-deux ans. Il entreprend aussitôt de moderniser et de développer l'institution créée sous Louis XIII afin d'y former des médecins et des apothicaires. Durant près de cinquante ans, il agrandit et enrichit les collections du jardin et du cabinet, notamment avec les spécimens collectés dans le monde par des explorateurs (▸ 1768) comme le comte de Bougainville (1729-1811).

Éclosion d'un centre de recherche

Buffon s'entoure de grands scientifiques comme le naturaliste Louis Daubenton, le botaniste Antoine Laurent de Jussieu ou le chimiste Antoine François Fourcroy pour transformer l'endroit en l'un des principaux établissements scientifiques de l'Ancien Régime, un lieu de visite et d'émerveillement, mais aussi un lieu d'enseignement de l'histoire naturelle. Contrairement aux cabinets de curiosités (▸ 1655), les collections y sont composées d'éléments répétés et de séries de spécimens, selon une conception qui privilégie l'étude des lois de la nature et annonce celle des Lumières.

> *« On apprend toujours quelque chose de nouveau en rangeant méthodiquement une collection, car dans ce genre d'étude plus on voit, plus on sait. »*
>
> Comte de Buffon, *Histoire naturelle*, tome III, 1749.

Floraison du Muséum

Quelques années après la mort de Buffon, le Jardin et le Cabinet du roi se transforment en une institution républicaine : le Muséum national d'Histoire naturelle. Louis Daubenton (1716-1799), qui assure le changement de régime, en devient le premier directeur. Douze chaires professorales sont créées au bénéfice des sciences naturelles, de la zoologie à la botanique en passant par le dessin naturaliste et la chimie appliquée aux arts. Depuis, le Muséum est devenu une référence en France pour la recherche, la médiation et l'enseignement des sciences naturelles.

Histoire naturelle et médecine

1480 — 1500 — 1520 — 1540 — 1560 — 1580 — 1600 — 1620

Théorie médicale de Paracelse 1527

1543 Vésale, *La Fabrique du corps humain*

Théâtre anatomique à Padoue 1594

Démonstration de la circulation sanguine par Harvey 1628

Une œuvre d'influence

L'*Histoire naturelle* de Buffon renferme des idées novatrices qui anticipent un changement de vision concernant la vie sur Terre. Bien que croyant à la création des espèces par Dieu, l'intendant du Jardin du roi remet en cause les textes bibliques en ce qui concerne l'âge de la Terre, la supposant beaucoup plus vieille qu'annoncé. Il envisage également, chez les animaux, la possibilité d'une variation morphologique sous l'influence du climat, de la nourriture ou de la domestication. Cette répercussion du temps qui passe sur la plasticité du vivant constitue le pilier sur lequel ont été construits, au XIXe siècle, le transformisme de Lamarck et l'évolutionnisme de Darwin (▶ 1809 et 1859, p. 230).

Un chef-d'œuvre des Lumières

Buffon est un précurseur de la vulgarisation des sciences. Son *Histoire naturelle*, en 36 volumes, séduit un vaste public mondain. Conçue pour présenter les collections du cabinet royal, elle s'est popularisée grâce aux descriptions anatomiques des animaux, de leurs mœurs et de leur utilité. Chaque entrée est accompagnée de gravures soigneusement élaborées par les peintres Jacques de Sève, pour les quadrupèdes, et François-Nicolas Martinet, pour les oiseaux.

Planche de l'*Histoire naturelle des oiseaux* de Buffon, XVIIIe siècle.

Buffon au Jardin du roi **1739**

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1635 Fondation du Jardin du roi à Paris

1669 Explication de la fossilisation par Steno

1675 Découverte des micro-organismes par Van Leeuwenhoek

Inoculation contre la variole à Constantinople 1714

1735 Linné, *Système de la nature*

1749 Premier tome de l'*Histoire naturelle* de Buffon

1745

Euler se lance dans la balistique

Leonhard Euler
1707-1783

Pour servir le roi de Prusse qui vient de l'embaucher, le mathématicien Leonhard Euler propose d'apporter une solution complète à un problème concret : calculer la trajectoire d'un boulet de canon dans l'air.

Comment plaire à un roi

À la fin de 1740, Leonhard Euler, originaire de Bâle et au service de l'Académie de Saint-Pétersbourg depuis treize ans, est à la croisée des chemins. La tsarine Anne vient de mourir. Alors qu'il s'interroge sur son avenir, Euler reçoit une offre alléchante du jeune roi de Prusse, Frédéric II, qui cherche à attirer les plus grands savants de l'Europe pour fonder une nouvelle Académie des sciences (▸ 1666, p. 138).

Euler accepte et s'installe à Berlin le 25 juillet 1741. Mais le courant passe mal entre le roi volage, qui cultive la compagnie des philosophes comme Voltaire et Maupertuis (▸ 1736), et le mathématicien calviniste. Frédéric II n'affiche que mépris pour les « abstractions des grandeurs de l'algèbre ». Pour mieux séduire le roi, qui combat alors en Silésie, Euler propose d'entreprendre un travail sur la balistique, la science des trajectoires des projectiles.

> *« Le désir infini de servir votre majesté m'a déterminé à appliquer mes forces à une science qui pourrait avoir quelque utilité importante pour le service de votre majesté. […] Je crois que je ne pourrais mieux satisfaire à mon désir qu'en travaillant sur un livre anglais sur l'artillerie. »*
>
> Lettre de Leonhard Euler à Frédéric II de Prusse, 1744.

Une solution complète, mais peu pratique

Pour cela, il prend appui sur un livre qui vient de paraître en Angleterre, les *New Principles of Gunnery* de Benjamin Robbins (1707-1751). Les nombreuses expériences de l'ouvrage montrent, n'en déplaise à Galilée (▸ 1610), que la trajectoire d'un boulet de canon n'est pas parabolique puisqu'il faut tenir compte de la résistance de l'air.

L'ouvrage, traduit en allemand par Euler en 1745, et enrichi de nombreux développements mathématiques, voit sa longueur multipliée par cinq. En 1753, le mathématicien parvient à résoudre les équations du mouvement d'un projectile dans l'air et exprime les résultats sous forme de tables. Mais de fait, les techniques qu'il propose ne peuvent être réellement mises en œuvre qu'au prix d'un effort calculatoire considérable, largement inenvisageable avant la Première Guerre mondiale.

Philosophie, techniques et culture

1480 | 1500 | 1520 | 1540 | 1560 | 1580 | 1600 | 1620

1509 Fortifications de Padoue

1522 Premier tour du monde en bateau

1556 Agricola, *De re metallica*

1600 Exécution du copernicien Giordano Bruno, condamné par l'Inquisition

1620 Bacon, *Instauratio Magna*

La science des canons

Pour atteindre une cible, les artilleurs cherchent, avec plus ou moins de succès depuis le XVI^e siècle, à appliquer les lois de la mécanique. Dans la pratique, même si l'usage des mathématiques se répand parmi les officiers (▶ 1600), les canons ne sont pas assez standardisés. Au XIX^e siècle, les techniques de la balistique se développent, notamment dans la marine, mais ce n'est qu'au XX^e siècle que cette science devient d'usage courant et décisif dans la guerre.

Antoine Benoist, dit du Cercle, *Artillerie, exercices avec la cavalerie et l'infanterie* (détail), XVIII^e siècle.

Une œuvre titanesque

Euler est peut-être le mathématicien le plus prolifique de tous les temps. Ses œuvres complètes, dont la publication n'est pas encore terminée, comprennent plus de 800 livres et articles qui ne se répètent que très peu et remplissent 74 tomes de 300 à 600 pages chacun. Grand maître du calcul différentiel et intégral, il a laissé une marque indélébile dans de nombreux domaines des mathématiques, de la géométrie à la théorie des nombres. Dans le domaine des applications, il a produit des contributions fondamentales en astronomie, cartographie, théorie de l'élasticité, hydraulique, mécanique des fluides et des corps rigides, musique, optique, etc. Dans ses *Lettres à une princesse d'Allemagne*, il a aussi su rendre ses travaux accessibles à un large public.

Étude de la trajectoire d'un boulet de canon **1745**

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1637 Descartes, *Discours de la méthode*

1657 Horloge de Huygens

1690 Machine à vapeur de Papin

1739 Hume, *Traité de la nature humaine*

1751 Parution du premier tome de l'*Encyclopédie*

1751

L'*Encyclopédie* devient l'étendard des Lumières

Jean Le Rond d'Alembert
1717-1783

L'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert met, comme jamais, les sciences, les arts et les techniques à l'honneur. Elle joue aussi le rôle de manifeste, celui des Lumières, qui désirent « éclairer » le monde par la raison et la science.

Une encyclopédie à la française

Offrir un inventaire des connaissances humaines de l'époque, voilà le projet commun du philosophe Denis Diderot (1713-1784) et du mathématicien Jean Le Rond d'Alembert. Il leur faudra plusieurs années de travail pour faire paraître, en 1751, le premier des dix-sept volumes de l'*Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. Heureusement, les deux hommes savent s'entourer.

À la différence des encyclopédies précédentes, l'*Encyclopédie* est en effet une œuvre collective. Diderot et d'Alembert ont recours aux plus grands savants, philosophes et écrivains de leur temps, mais aussi à de nombreux artisans ou artistes anonymes.

Car l'une de leurs ambitions est de réhabiliter les « arts mécaniques », c'est-à-dire les disciplines qui réclament une habileté manuelle (horlogerie, imprimerie, agriculture, tissage, etc.) et sont victimes d'un préjugé hérité de l'Antiquité face aux « arts libéraux » (disciplines intellectuelles).

Une œuvre de combat

L'*Encyclopédie* est aussi une œuvre critique, véhiculant les idées des Lumières. Critique de la superstition, du fanatisme, des interdits de pensée, de l'autorité surtout, et des dogmes de l'Église, l'œuvre est traversée par les plus importants combats politiques, religieux, moraux et scientifiques de son temps, ce qui ne laisse pas les autorités religieuses et monarchiques sans réaction.

Dès la parution du premier volume, les jésuites dénoncent des plagiats et lancent contre l'*Encyclopédie* une grave accusation d'« impiété ». En 1752, un arrêt royal déclare qu'elle contient des maximes « tendant à détruire l'autorité royale, à élever les fondements de l'erreur, de la corruption des mœurs, de l'irréligion et de l'incrédulité ». La publication est interrompue.

En 1759, l'ouvrage est à nouveau interdit et mis à l'Index. Les dix derniers des dix-sept volumes de texte sont achevés en secret, imprimés hors de Paris et publiés six ans plus tard. Le dernier des onze tomes de planches paraît en 1772, soit vingt et un ans après le début de l'aventure.

La preuve par l'image

Pour Diderot, un « coup d'œil sur l'objet ou sur sa représentation en dit plus qu'une page de discours ». C'est ainsi que l'*Encyclopédie* rassemble 2 579 planches dans 11 tomes ! Les arts « mécaniques », jusqu'alors largement ignorés, y figurent dans leur ensemble, de l'art de la tête d'épingle à celui de l'écriture. Par sa vocation pédagogique, l'*Encyclopédie* s'oppose au secret des ateliers et bouleverse la hiérarchie traditionnelle des connaissances.

L'art d'écrire, planche III du deuxième tome du Recueil de planches de l'*Encyclopédie*, 1763.

Une œuvre titanesque

Publiés entre 1751 et 1772, les 28 volumes de l'*Encyclopédie* contiennent plus de 74 000 articles et près de 2 600 planches gravées. Cette œuvre a nécessité plus de 150 contributeurs parmi lesquels Daubenton (histoire naturelle), Bordeu et Tronchin (médecine), Rousseau (musique), Voltaire (histoire et lettres), etc. Diffusée à 4 000 exemplaires, il s'agit de la plus grande entreprise éditoriale du XVIII^e siècle, tant en volume et capital investi qu'en force humaine employée. Aujourd'hui, le travail se poursuit en ligne avec une Édition numérique collaborative et critique de l'Encyclopédie (ENCCRE), accessible à tous.

« Faites naître, s'il est possible, des géomètres parmi ces peuples ; c'est une semence qui produira des philosophes avec le temps, et presque sans qu'on s'en aperçoive. »

Jean Le Rond d'Alembert, *Encyclopédie*, vol. VII, article « Géomètre », 1757.

Premier tome de l'*Encyclopédie* **1751**

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1637 Descartes, *Discours de la méthode*

1657 Horloge de Huygens

1690 Machine à vapeur de Papin

1739 Hume, *Traité de la nature humaine*

1756

Une marquise explique Newton aux Français

Émilie de Breteuil, marquise Du Châtelet
1706-1749

Par sa traduction française commentée des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* de Newton, Émilie Du Châtelet entre, à titre posthume, dans le cercle très restreint et très masculin des savants de son époque.

La défaite des cartésiens face aux newtoniens

Au début du XVIIIe siècle, en France, une vive querelle oppose les cartésiens, « impulsionnaires », pour lesquels tout mouvement trouve son origine dans les contacts directs et les tourbillons, et les « attractionnaires », partisans de la théorie gravitationnelle de Newton. Pierre Louis Moreau de Maupertuis et Alexis Claude Clairaut (▸ 1736) confirment les prédictions newtoniennes d'aplatissement de la Terre aux pôles et du retour à la date prévue de la comète « de Halley », ce qui conduit à l'effacement des derniers cartésiens.

Une femme passionnée

De retour de son exil londonien, Voltaire rencontre en 1733 une brillante et savante jeune femme, Émilie Du Châtelet. Liés par l'amour et surtout la même passion pour l'œuvre de Newton, ils s'équipent d'un cabinet de physique et se consacrent à la diffusion de sa pensée. Pour éclairer les débats scientifiques, Du Châtelet étudie les nouveautés mathématiques et physiques de son temps, se posant comme médiatrice entre savants et hommes de culture. De 1746 à 1749, elle travaille à la traduction des *Principia* de Newton (▸ 1687) en français, la langue érudite européenne au XVIIIe siècle.

Une traduction… qui améliore l'original

Émilie Du Châtelet ne se contente pas de traduire fidèlement les *Principia*. Elle y ajoute à la fin une contribution personnelle capitale pour son rayonnement continental. Dans un premier chapitre, par sa compréhension de la mécanique newtonienne, elle rend cette philosophie « facile à entendre » par les érudits de son temps. Ensuite, elle transpose les raisonnements géométriques de Newton en présentations « analytiques » faisant usage du nouveau calcul différentiel et intégral de Leibniz.

Inquiète des suites de son accouchement, elle signe le manuscrit qu'elle fait déposer à la Bibliothèque royale… et s'éteint le lendemain. Voltaire et Clairaut œuvrent à la publication de son ouvrage qui paraît en 1756, puis en 1759 dans sa forme définitive. Il s'agit de la seule traduction française jusqu'à ce jour.

Sciences expérimentales

1480 1500 1520 1540 1560 1580 1600 1620

1516 Arrivée de Léonard de Vinci en France

1537 Développement de la mécanique de l'artillerie par Tartaglia

1600 Gilbert, *De l'aimant*

Galilée, *Messager céleste* 1610

Énoncé de la loi de la réfraction par Snell 1628

Le portrait d'une femme savante

Née dans une famille aristocrate à l'esprit ouvert, la jeune Émilie bénéficie de la même éducation que ses frères. Elle sait se montrer coquette en société mais se retire également sur ses terres pour un travail acharné. Elle est dépeinte comme libertine, exigeante et ambitieuse. Son intelligence critique lui permet d'accéder aux connaissances scientifiques de son temps. Elle s'attache les amitiés de Voltaire, Maupertuis, Clairaut et de bien d'autres.

Gabrielle Émilie Le Tonnelier de Breteuil.

De la controverse à la célébrité

En 1740, dans ses *Institutions de physique*, Émilie Du Châtelet critique vivement un mémoire de Dortous de Mairan, le secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences (► 1666, p. 138), qui réagit furieusement. Le sujet de la discorde concerne les forces vives (ou énergie cinétique). Tandis que Mairan les assimile à la vitesse, Du Châtelet soutient que ces forces sont proportionnelles au carré de la vitesse et le prouve par des expériences. Elle a donc raison, « pour le fond et pour la forme ». Cette controverse attire les regards : son ouvrage est traduit en plusieurs langues. En 1746, elle est élue à l'Académie des sciences de Bologne et entre dans la Décade d'Augsbourg, c'est-à-dire parmi les dix savants les plus célèbres de son temps.

« Les femmes sont exclues, par leur état, de toute espèce de gloire, et quand, par hasard, il s'en trouve quelqu'une qui est née avec une âme assez élevée, il ne lui reste que l'étude pour la consoler de toutes les exclusions et de toutes les dépendances auxquelles elle se trouve condamnée. »

Émilie Du Châtelet, *Discours sur le bonheur*, 1744-1746, publié en 1779.

Traduction de Newton en français **1756**

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1644 Invention du baromètre par Torricelli

1672 Décomposition prismatique de la lumière blanche par Newton

Échelle thermométrique de Celsius 1742

1751 Découverte de la nature électrique des éclairs par Franklin

Découverte de l'hydrogène par Cavendish 1766

1761

Un horloger anglais sauve la Navy

John Harrison
1693-1776

En 1741, le parlement anglais promet une récompense de 20 000 livres à celui qui aidera les marins à déterminer leur longitude avec précision. C'est l'horloger John Harrison qui remporte le prix en inventant le chronomètre de marine.

Une erreur de longitude désastreuse

En octobre 1707, par gros temps, la flotte anglaise de l'amiral Shovell fait naufrage au large des îles Sorlingues, à 45 km des côtes anglaises. Près de 2 000 hommes périssent. La cause de ce désastre vient de l'imprécision de la mesure de la longitude en mer.

En 1741, le parlement anglais vote le *Longitude Act* et décide d'attribuer la coquette somme de 20 000 livres (plus de 2 millions d'euros) à celui qui trouvera une solution théorique ou instrumentale susceptible d'aider les navires à se positionner en mer avec une précision inférieure au demi-degré, soit à 30 miles ou 55 kilomètres près.

Un garde-temps de précision

L'une des solutions consiste à emporter à bord une montre suffisamment précise pour garder l'heure d'un lieu de référence. En comparant l'heure de passage du soleil au méridien du bateau à celle de son passage au méridien d'origine, il est alors possible de calculer avec précision la longitude du bateau. Or les montres à ressort de l'époque sont inutilisables en mer.

Avec l'aide de l'horloger George Graham (1673-1751) et de l'astronome et ingénieur Edmond Halley (1656-1742), John Harrison, ébéniste et horloger anglais de son état, relève le défi ! Il conçoit entre 1735 et 1759 quatre prototypes de chronomètre dont la précision croissante atteint, avec le H4, la dérive de 5 secondes pour 81 jours d'un voyage en Jamaïque.

Le compagnon des grandes explorations

Grâce à ces chronomètres, il est enfin possible de déterminer la longitude avec précision. Ces instruments seront d'ailleurs utilisés par les plus grands explorateurs tels James Cook (▸ 1768) ou Jean-François de La Pérouse (1741-1788). Toutefois, à la fin du XVIII[e] siècle, tous les navires sont encore loin d'en être équipés. Ainsi, la frégate française *La Méduse* échoue au large des côtes de Mauritanie en 1816 à cause d'une erreur de position. Théodore Géricault immortalisera la scène du naufrage dans son célèbre tableau *Le Radeau de La Méduse*.

Les innovations de Harrison

En mer, le balancier des horloges est soumis aux mouvements des navires et certaines pièces se dilatent avec la température. Conséquence : les horloges sont exposées à des variations de rythme. Pour résoudre ces problèmes d'irrégularités, Harrison invente le balancier bimétal, le bilame et le roulement à billes. Ces innovations sont concentrées dans un objet de 13,2 cm de diamètre : le chronomètre H4.

Le chronomètre de marine H4.

Les autres méthodes de calcul

Des méthodes de positionnement en longitude existent avant l'usage des chronomètres. Elles se fondent sur des observations astronomiques, comme par exemple les éclipses des satellites de Jupiter ou la méthode des distances lunaires. Cette dernière méthode compare deux positions de la Lune par rapport aux étoiles, celle donnée pour la longitude de Greenwich par les tables de valeurs et celle du lieu de mesure. Grâce à la précision de l'instrument de mesure d'angle de John Hadley (1682-1744), elle bénéficie d'un certain succès au XVIII^e^ siècle. Toutefois, elle ne rivalise pas avec les performances du chronomètre H4.

Invention du chronomètre de marine **1761**

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1637 Descartes, *Discours de la méthode*

1657 Horloge de Huygens

1690 Machine à vapeur de Papin

1739 Hume, *Traité de la nature humaine*

1751 Parution du premier tome de l'*Encyclopédie*

1768

James Cook dessine les contours du Pacifique

James Cook
1728-1779

Au cours de ses trois grands voyages, le marin britannique James Cook cartographie les côtes de l'hémisphère austral. Il rend alors accessibles à la navigation et à la colonisation des zones de la planète encore inexplorées par les Européens.

Objectif *Terra incognita*

Le capitaine James Cook a toujours nourri l'espoir de découvrir la *Terra australis incognita*, un continent imaginaire évoqué dès le IIe siècle par l'astronome grec Ptolémée (▸ 127) et dessiné sur les cartes européennes à partir du XVe siècle. S'inspirant de la carte de l'explorateur français Bouvet de Lozier (1706-1786) – qui, le premier, semble l'avoir aperçu –, Cook recherchera toute sa vie les côtes de l'Antarctique.

> *« J'ambitionnais non seulement d'aller plus loin qu'aucun homme n'était encore allé, mais aussi loin qu'il était possible d'aller. »*
>
> James Cook, *Relations de voyages autour du monde*, 1768-1779.

À la conquête du Pacifique

James Cook quitte le port de Plymouth une première fois, en 1768, avec l'idée de préciser l'étendue du fameux continent austral. Il n'y parvient pas mais cartographie la côte orientale de l'Australie et le détroit qui sépare les deux îles principales de la Nouvelle-Zélande. À cette époque, intérêts politiques, économiques, militaires et scientifiques s'entremêlent et de nombreux navires se lancent dans des explorations désormais célèbres.

Lors de ses deuxième et troisième expéditions, Cook continue son exploration du Pacifique Sud puis du Pacifique Nord. Il s'aventure jusqu'en Alaska et aux îles Aléoutiennes, et, de retour vers le sud, découvre les îles de Maui et d'Hawaï au beau milieu de l'océan. C'est là qu'il va finalement mourir.

Une ouverture sur le monde

Si James Cook n'atteint jamais son but, ses explorations le conduisent à cartographier une grande partie de l'hémisphère Sud. Une cartographie qui facilite grandement l'ouverture de nouvelles routes commerciales et les échanges entre l'Europe et les parties les plus reculées du monde. Par ailleurs, les animaux, les plantes et les minéraux collectés lors de ces expéditions, en grande partie grâce à l'expérience des populations locales, alimentent les collections européennes.

Philosophie, techniques et culture

1480 | 1500 | 1520 | 1540 | 1560 | 1580 | 1600 | 1620

- **1509** Fortifications de Padoue
- **1522** Premier tour du monde en bateau
- **1556** Agricola, *De re metallica*
- **1600** Exécution du copernicien Giordano Bruno, condamné par l'Inquisition
- **1620** Bacon, *Instauratio Magna*

Aux sources de l'ethnologie

Alors que les savoirs des populations autochtones sont indispensables à l'installation des colons, leurs mœurs commencent à susciter l'intérêt. Une nouvelle discipline, proche de l'anthropologie, prend alors corps. Il s'agit de l'ethnologie. Loin des images exotiques véhiculées à l'époque, la discipline cherche à analyser et à comparer objectivement les traits socioculturels caractéristiques des peuples rencontrés par les explorateurs.

Jean-Baptiste Debret, *Nègres chasseurs rentrant en ville, Le retour des nègres d'un naturaliste*, 1820.

Des expéditions à la française

Parallèlement aux expéditions britanniques, plusieurs voyages d'exploration partent du port de Brest au XVIII[e] siècle. En 1766, Louis Antoine de Bougainville (1729-1811) se fait accompagner par des scientifiques pour son tour du monde. Ils explorent de nombreux archipels du Pacifique Sud qui resteront, pendant longtemps, l'image du paradis sur terre pour les Européens. En 1785, le comte de La Pérouse (1741-1788) commence sa circumnavigation du globe. L'expédition disparaît près des îles Salomon après avoir accosté en Australie. Le sort des expéditionnaires est resté énigmatique malgré les efforts déployés pour les retrouver. Et les épaves n'ont été identifiées que dans les années 1960.

Cartographie de l'hémisphère austral **1768**

1640 — 1660 — 1680 — 1700 — 1720 — 1740 — 1760 — 1780

1637 Descartes, *Discours de la méthode*

1657 Horloge de Huygens

1690 Machine à vapeur de Papin

1739 Hume, *Traité de la nature humaine*

1751 Parution du premier tome de l'*Encyclopédie*

La « découverte » des longitudes

Pendant près de trois siècles, la quête d'une méthode pratique pour mesurer sa longitude en mer conduit savants et artisans à développer les sciences astronomiques et les instruments de mesure du temps.

Chacun sa part du globe

En 1494, l'Espagne et le Portugal se partagent le monde par le traité de Tordesillas. Entre leurs zones d'influence respectives, le traité établit une ligne de démarcation le long d'un méridien situé à 370 lieues à l'ouest des îles du Cap-Vert. Mais de l'autre côté du globe, où il est plus difficile d'établir la position exacte de la ligne de démarcation, la flotte de Magellan dispute aux Portugais la possession des Moluques, riches en épices. Aujourd'hui en Indonésie, ces îles se situeraient en fait dans l'hémisphère assigné aux Espagnols. Pour trancher la question, les « cosmographes » des deux puissances se réunissent en 1524, mais ne s'entendent pas sur la coordonnée géographique exacte du méridien. En 1529, le traité de Saragosse, en fixant la ligne de démarcation à 297,5 lieues à l'est des Moluques, résout les tensions diplomatiques, mais non le problème scientifique.

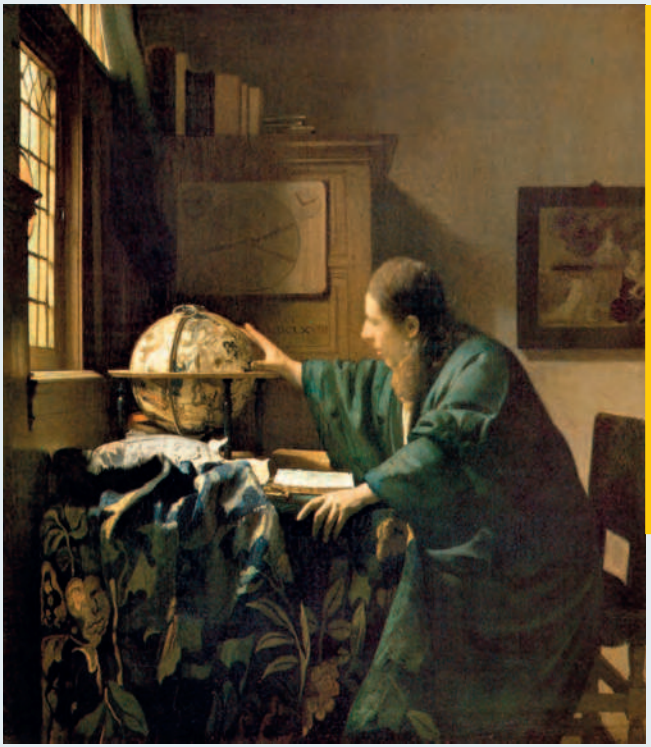
Le prix de la précision

Dès 1567, le roi Philippe II d'Espagne lance un concours pour trouver une méthode pratique et efficace permettant de calculer la longitude d'un lieu. Sans succès. Trente ans plus tard, son fils Philippe III offre alors la somme considérable de 6 000 ducats et une pension à vie de 2 000 ducats à celui qui arrivera à « découvrir les longitudes ». En 1636, c'est au tour de la Hollande d'offrir une récompense à celui qui inventera enfin une méthode pratique.

Ces récompenses attirent l'attention de tous les savants. En 1616, Galilée propose aux autorités espagnoles d'utiliser l'observation des satellites de Jupiter récemment découverts (▸ 1610). En effet, ces derniers sont périodiquement, et à heures fixes, éclipsés par la planète autour de laquelle ils gravitent, et peuvent donc procurer aux marins une horloge universelle. La différence entre cette heure universelle et l'heure locale, calée sur le mouvement du Soleil, permet de calculer la longitude d'un lieu d'observation. Mais ni les Espagnols ni les Hollandais ne jugent cette méthode pratique, l'observation des satellites en mer à l'aide de lunettes, d'ailleurs encore peu répandues (▸ 1626), n'étant vraiment pas aisée.

Sur la mer comme au ciel

Quand Colbert fonde l'Académie des sciences (▸ 1666, p. 138), il s'assure d'y attirer les deux savants les mieux placés pour résoudre la question des longitudes : le physicien hollandais Christian Huygens (1629-1695), qui a inventé une horloge à pendule susceptible de garder le temps en mer sur une longue période, et l'astronome italien Jean Dominique Cassini (1625-1712), déjà célèbre pour ses tables du mouvement des satellites de Jupiter. En combinant l'usage de ces tables et d'horloges précises à la connaissance de la dimension du globe terrestre, les savants proposent enfin une méthode sûre pour déterminer les longitudes. Pourvu toutefois qu'on reste… sur la terre ferme. Ce n'est que près d'un siècle plus tard que l'horloger anglais John Harrison (▸ 1761) remporte, avec son chronomètre de marine, le prix proposé à cet effet par le parlement britannique.



Le monde à portée de main

L'astronome du peintre néerlandais Vermeer tend la main vers un globe céleste qui représente les constellations. Posés devant lui, un compas, un astrolabe et un livre ouvert symbolisent la nature de son travail. La fenêtre ouverte devant lui montre cependant que son regard, délaissant les mythes de l'astrologie divinatoire, se porte aussi vers le vaste monde qu'il contribue à faire connaître.

Jan Vermeer, *L'Astronome*, 1668.

« La recherche d'une méthode exacte pour trouver les longitudes en mer, est un problème qui a beaucoup exercé les mathématiciens des deux derniers siècles ; […] les projets se sont toujours trouvés mauvais, supposant des opérations trop impraticables, ou vicieuses par quelque endroit ; de façon que la palme n'a encore été déférée à personne. »

Jean Le Rond d'Alembert, « Longitude », *Encyclopédie des sciences, des arts et des métiers*, 1765.

Les nouveaux instruments de la science

Au XVII^e siècle, la philosophie naturelle, qui étudie le monde physique, intègre les instruments scientifiques à sa démarche. Ces instruments, comme la lunette, la machine pneumatique ou le générateur électrostatique, révèlent alors de nouveaux objets et phénomènes naturels, et remettent en question les systèmes philosophiques hérités de l'Antiquité.

Des instruments mathématiques

Les premiers instruments scientifiques trouvent leur origine dans le domaine des arts et des sciences mathématiques : on se sert de cadrans solaires, de quadrants astronomiques et d'astrolabes depuis l'Antiquité. À la fin du Moyen Âge, le développement de la navigation et du commerce stimule l'innovation technique et l'émergence de nouveaux appareils, comme l'horloge mécanique (▸ 1368). À la Renaissance, l'apparition d'ateliers spécialisés dans la production d'instruments scientifiques, aux Pays-Bas et dans le nord de l'Italie, marque un tournant. Essentiel pour faire émerger et soutenir l'idée d'un cosmos régulier et géométrique, l'usage de ces instruments n'entre pas pour une part fondamentale dans la réflexion sur le monde physique.

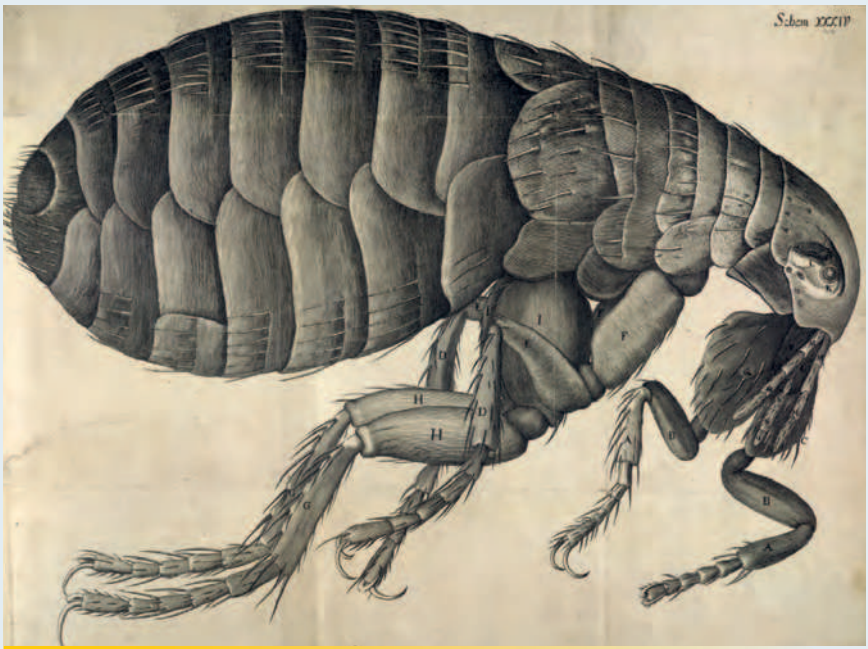
Des instruments pour philosopher

Apparaît alors un nouveau type d'instruments qu'on appelle « philosophiques », dont l'usage va révéler de nouveaux phénomènes ou objets naturels. Ainsi, la lunette astronomique est utilisée par Galilée pour remettre en question la cosmologie d'Aristote et soutenir la théorie héliocentrique de Copernic (▸ 1610). Quelques décennies plus tard, le microscope offre l'espoir de découvrir la composition de la matière à l'échelle la plus petite.

À côté de ces appareils optiques, qui se limitent à améliorer notre capacité visuelle, les savants du XVII^e siècle développent de nouveaux instruments qui créent des phénomènes inconnus jusqu'alors. La machine pneumatique en est sans doute l'exemple le plus paradigmatique. Cette machine qui réduit la présence d'air dans un espace clos permet de créer du « vide » et d'observer ses effets sur des objets ou des êtres vivants (▸ 1659). Le générateur électrostatique, de son côté, produit de puissantes décharges et autres phénomènes électriques.

De l'atelier au salon

À la différence des instruments mathématiques traditionnels, ces nouveaux instruments sont le fruit du travail de savants et de leurs assistants dans leurs ateliers et laboratoires. Leur caractère innovant est objet de suspicion. C'est le cas de la lunette de Galilée, dont les observations ne sont acceptées qu'après de nombreuses vérifications et l'appui de savants prestigieux. La machine pneumatique fait aussi l'objet de controverses : Thomas Hobbes (1588-1679) nie qu'il soit possible d'émettre des conclusions générales sur la nature à partir d'expériences faites sur un mécanisme artificiel. En revanche, Robert Boyle défend l'idée que la réalisation d'expériences sous la supervision de témoins fiables est la meilleure manière de surmonter les différences d'interprétation dues à la division des écoles philosophiques, religieuses ou politiques. La présence d'un public témoin, dans les académies comme dans les salons, caractérise l'usage des instruments aux XVII^e^ et XVIII^e^ siècles, période où académies savantes et salons aristocratiques deviennent des espaces clés de la discussion scientifique (▸ 1666, p. 138).



Le microscope révèle la complexité du monde

Inventé vers le début du XVII^e^ siècle, en même temps que la lunette, le microscope profite à l'entomologie avant d'investir la botanique, la minéralogie et l'anatomie. La publication de *Micrographia*, en 1665, par Robert Hooke, marque un tournant dans l'histoire de la microscopie. Riche en observations et spéculations, l'ouvrage inspire les travaux d'Antonie Van Leeuwenhoek, le plus doué des microscopistes du XVII^e^ siècle, qui observe par la première fois des spermatozoïdes, des bactéries et des globules rouges.

Dessin d'une puce vue sous le microscope dans l'ouvrage *Micrographia*, de Robert Hooke, 1665.

Des sciences pour l'industrie

1770-1870

Fille des Lumières, la science moderne prend corps dans une Europe en mutation, où les anciennes structures politiques et sociales s'effritent sous les coups de boutoir de l'industrie.
Des académies consolidées, des universités reformées ainsi que de nouvelles sociétés scientifiques réorganisent les rapports entre les savoirs et font émerger la figure du scientifique professionnel.
De nouveaux champs d'études, comme l'électromagnétisme ou la thermodynamique, mettent la physique au service de l'industrie.
Le savoir naturaliste, guidé par l'idée de l'évolution, donne lieu à une nouvelle vision de la Terre et du vivant.

Ron Lampitt, *The Industrial Revolution*, 1974.

Des sciences pour l'industrie

1770-1870

L'industrie transforme le monde

Depuis la fin du XVIII^e^ siècle, la révolution industrielle transforme les sociétés européennes. Basée sur l'usage de la machine à vapeur (► 1769, p. 174) et la mécanisation du secteur textile (► 1769, p. 176), elle est contemporaine de l'essor de la chimie moderne, redéfinie à l'aide du nouveau vocabulaire et du cadre conceptuel élaborés par Lavoisier (► 1789). L'électricité éveille la curiosité du public et attire l'attention des savants, qui essaient de l'intégrer aux conceptions newtoniennes (► 1785). Mais c'est l'invention de la pile (► 1800) et l'exploration de ses rapports avec le magnétisme (► 1820) qui amènent l'électricité à être utilisée dans l'industrie et les communications. Au même moment, l'étude des phénomènes thermiques donne naissance au concept d'énergie (► 1843 et dossier, p. 238-239), concept universel permettant de quantifier des domaines aussi divers que la mécanique et l'étude du métabolisme des êtres vivants.

Des nouveaux professionnels

Cette science devenue moderne se caractérise aussi par un nouvel environnement institutionnel. Les académies scientifiques, répandues dans toute l'Europe au XVIII^e^ siècle, resserrent leurs liens avec les gouvernements (► 1774), affirment leur autorité sur les questions techniques et scientifiques (► 1784) et impulsent d'ambitieux projets de standardisation, comme celui qui conduit au système métrique (► 1791). Au début du XIX^e^ siècle, les universités modernisées (► 1810) s'ouvrent à la recherche (► 1824, p. 212). Les sciences naturelles se professionnalisent, et de nouvelles sciences sociales apparaissent : la sociologie (► 1830), l'économie ou la statistique (► 1835).

Vers la biomédecine

Des changements majeurs affectent aussi la médecine, bouleversée par des innovations comme la vaccination (► 1796) ou l'antisepsie (► 1847). L'origine microbienne des maladies est établie (► 1859, p. 228). L'évolution des méthodes de soin fait l'objet d'âpres débats entre praticiens (► 1784) et conduit à la transformation d'institutions vénérables comme l'hôpital. C'est dans ce contexte qu'émerge l'idée d'une médecine expérimentale (► 1865, p. 234) prônant une articulation étroite entre pratique médicale et sciences de laboratoire. Elle sera à l'origine des nouvelles sciences biomédicales.

Le vivant a une histoire

Dans les muséums d'histoire naturelle, les savants accumulent des objets et spécimens ramenés de nombreuses expéditions d'exploration (► 1768). Étudiées de plus en plus rigoureusement, ces collections font émerger une vision des sciences du vivant qui remet en question le dogme de l'immutabilité des espèces (► 1809). Accueillie avec scepticisme par les naturalistes les plus influents (► 1804), l'évolution des espèces est discutée dans *L'Origine des espèces* de Charles Darwin (► 1859, p. 230) et s'articule avec une nouvelle image de l'histoire de la Terre vieille de plusieurs millions d'années, comme celle proposée par le géologue Charles Lyell (► 1833). La théorie laisse certaines questions ouvertes, comme la transmission des caractères entre générations, un sujet qui ne sera intégré à la théorie darwinienne de l'évolution qu'à la suite de la redécouverte des travaux de Georg Mendel (► 1865, p. 232) au début du XX^e^ siècle (► 1910).

1796
Invention de la vaccination par Jenner

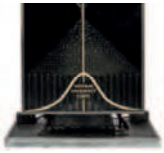
1799
Humboldt, naissance de l'écologie

1789
Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*

1769
Brevet de la machine à vapeur par Watt

1800
Invention de la pile électrique par Volta

1801
Méthode des moindres carrés de Gauss



1784
Rejet du magnétisme animal

1770 — 1780 — 1790 — 1800 — 1810

1776
Indépendance des États-Unis d'Amérique

1789 Révolution française

Bataille de Waterloo, fin de l'empire napoléonien 1815

1774
Gouvernement « éclairé par la science » de Turgot

1785
Coulomb, *Mémoires sur l'électricité et le magnétisme*

1804
Cuvier, *Leçon d'anatomie comparée*

1810
Création de l'université de Berlin

1791
Naissance du mètre

1814
Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*

1794
Sophie Germain, interdite d'entrée à Polytechnique

1816
Shelley, *Frankenstein ou le Prométhée moderne*

1820
Œrsted, lien entre électricité et magnétisme

1824
Mise en place du « système américain de production »

1856
Premier colorant artificiel par Perkin

1859
Darwin, *L'Origine des espèces*

1820 1830 1840 1850 1860 1870

1824 Bataille d'Ayacucho, indépendance de la plupart des pays sud-américains

1830 Révolution de Juillet en France

1848 Révolutions en plusieurs pays européens

1850-1864 Révolte des Taiping en Chine

Guerre civile aux États-Unis 1861-1865

Fin du système féodal au Japon, début de l'ère Meiji 1867-1868

Guerre Franco-Prussienne, unification de l'Allemagne et de l'Italie 1870-1871

1833
Lyell, *Principes de géologie*

1835
Quetelet, *Sur l'homme et le développement de ses facultés*

1843
Joule, *Sur l'équivalent mécanique de la chaleur*

1859
Mise au point du spectroscope par Bunsen et Kirchhoff

1865
Lois de l'hérédité par Mendel

1869
Tableau périodique des éléments par Mendeleïev

1769

Watt dépose un brevet pour une machine à vapeur

James Watt
1736-1819

James Watt brevette un moteur à vapeur beaucoup plus efficace que ceux fabriqués jusque-là. Avec Matthew Boulton, il fonde une entreprise qui va faire de cette machine la technologie phare de la révolution industrielle.

La réparation de la machine de Newcomen

Né dans une famille écossaise assez fortunée, James Watt travaille dès son plus jeune âge dans l'atelier de son père, un constructeur de bateaux. Intéressé par les sciences, il se lance à dix-sept ans dans la fabrication d'instruments scientifiques. C'est dans le cadre de cette activité qu'un client lui demande de réparer une machine à vapeur semblable à celle inventée par Thomas Newcomen (1663-1729) au début du XVIII^e siècle. Watt est frappé par l'inefficacité de cette machine d'un point de vue énergétique.

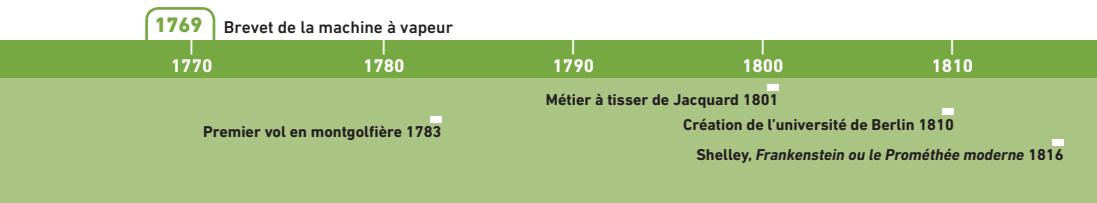
Vers des moteurs plus efficaces

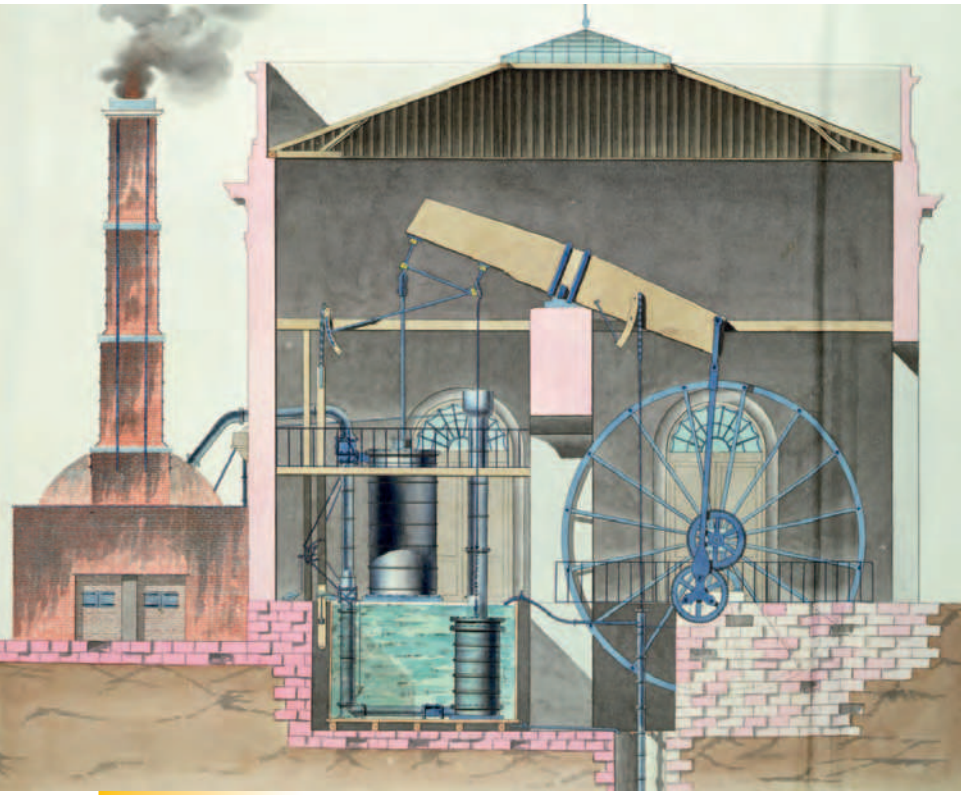
Ce constat l'amène à faire, en 1765, une invention fondamentale : le condenseur séparé. Alors que dans la machine de Newcomen la condensation de la vapeur se fait au sein du cylindre, Watt conçoit une chambre de condensation distincte. Cela lui permet de doubler l'efficacité du moteur. James Watt étant très pris par son nouveau métier d'arpenteur, il ne brevette sa machine qu'en 1769. Quelques années plus tard, il crée une entreprise avec Matthew Boulton, un industriel du nord de l'Angleterre, afin de la commercialiser.

Des machines à vapeur révolutionnaires

Comme les machines de Boulton and Watt sont particulièrement économes en carburant, James Watt parvient à convaincre des mines de cuivre et d'étain en Cornouailles de les adopter afin de pomper l'eau qui risque de les inonder. Bientôt les commandes affluent, provenant des filatures, des brasseries et des minoteries du pays. Watt et Boulton exercent un quasi-monopole sur les machines à vapeur jusqu'en 1800.

Lorsque le brevet tombe dans le domaine public, on compte cinq cents machines en service au Royaume-Uni. Elles vont se multiplier pendant les décennies suivantes et se révéler capitales pour l'industrialisation de l'Europe et de l'Amérique du Nord.





La machine de Watt

La vapeur provenant d'une chaudière est introduite dans un cylindre métallique et fait monter le piston. La vapeur entre ensuite dans le condenseur (installé dans la cuve) et s'y transforme en eau. Cette transformation crée un vide dans le cylindre, ce qui attire le piston vers le bas. Les mouvements du piston actionnent la poutre et la roue.

Dessin de la machine de Watt actionnant une roue, XVIIIe siècle.

Le début de l'anthropocène

Le moteur de Watt, dont l'avantage principal est d'être plus économe en carburant que les machines à vapeur qui l'ont précédé, a l'effet paradoxal d'augmenter considérablement la consommation de charbon à l'échelle mondiale. En effet, comme il est moins coûteux d'utiliser ces machines, un très grand nombre d'usines vont les adopter à la fin du XVIIIe siècle et pendant tout le XIXe siècle. Cela entraîne une utilisation accrue de charbon et une augmentation de la production de gaz à effets de serre qui changent l'atmosphère et les écosystèmes. D'après le chimiste et météorologue Paul Crutzen (né en 1933), les inventions de James Watt marquent le début d'une nouvelle ère géologique, l'anthropocène, au cours de laquelle les hommes transforment profondément leur environnement terrestre.

Techniques et culture

1820 | 1830 | 1840 | 1850 | 1860 | 1870

1822 Déchiffrement des hiéroglyphes par Champollion

1827 Première photographie de Niépce

Première ligne télégraphique aux États-Unis 1843

1848 Marx et Engels, *Manifeste du parti communiste*

1851 Exposition universelle à Londres

1769

Un perruquier anglais brevette un métier à filer

Richard Arkwright
1732-1792

Richard Arkwright, barbier et perruquier de son état, dépose un brevet sur une machine qui mécanise la fabrication du fil de coton. Il l'exploite alors en bâtissant des filatures toujours plus grandes, qui deviendront les symboles de la révolution industrielle.

Un perruquier ingénieux et peu scrupuleux

Richard Arkwright, treizième enfant d'une famille de tisserands, apprend le métier de barbier. Il se lance ensuite dans la fabrication et le commerce de perruques imperméables. Comme la demande pour ses perruques décline, il conçoit, en collaboration avec un horloger, une machine pour produire du fil de coton. Ce métier à filer mécanise alors une opération qui était jusque-là manuelle. Arkwright brevette cette invention en 1769, sous son seul nom, ce qui lui vaudra de nombreux procès.

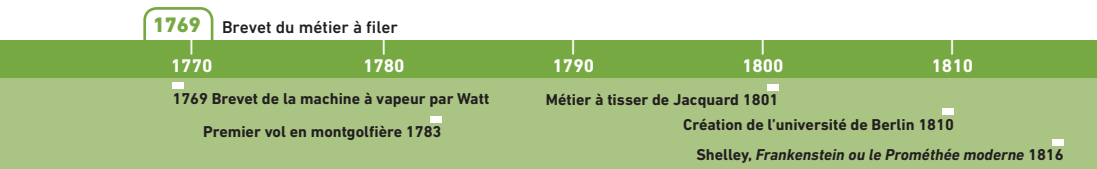
L'exploitation du brevet du métier à filer

Ayant dès lors le monopole de la fabrication mécanique du fil de coton grâce à son brevet, Arkwright s'associe à des hommes d'affaires pour construire des filatures de plus en plus importantes. Certaines utilisent les machines à vapeur de James Watt (▸ 1769, p. 174).

Arkwright vend aussi des licences sur son brevet, à la condition que les industriels qui les exploitent installent dans leurs usines un minimum de mille broches – ces tiges métalliques sur lesquelles sont insérées les bobines de fil. Comme ces industriels sont relativement peu nombreux, Arkwright et ses associés peuvent repérer facilement ceux qui oublient de payer leurs redevances !

Père de la grande usine textile

Son usine la plus novatrice est sans doute celle qu'il ouvre à Manchester en 1786. Celle-ci repose sur une division approfondie du travail et une mécanisation très poussée de la production. Elle emploie plus de six cents personnes, surtout des femmes et des enfants dont certains n'ont que six ans. Les salaires sont très bas et les conditions de travail dangereuses. L'usine produit ainsi du fil de coton en très grande quantité et à très bas coût. Elle servira de modèle aux usines textiles qui se développeront à Manchester et dans le Lancashire à la fin du XVIII^e siècle.



Richard Arkwright, un industriel richissime

Richard Arkwright, né dans une famille très pauvre, bâtit une fortune colossale sur la base des redevances sur ses brevets et des investissements qu'il fait dans une centaine de filatures. À sa mort, sa fortune s'élève à 500 000 livres (soit environ 800 millions d'euros aujourd'hui).

Richard Arkwright, 1790.

Manchester, ville du coton

Manchester, petite ville en 1770, devient rapidement le plus grand centre au monde de l'industrie textile. En 1851, plus de 56 000 personnes produisent du fil et des tissus de coton à Manchester et dans ses environs. La ville est aussi connue pour les conditions effroyables dans lesquelles travaillent et vivent les ouvriers : une ville enfumée et nauséabonde, des familles entières entassées dans des caves humides, des foules d'enfants et de femmes déguenillés dans les rues… Ces conditions sont dénoncées par Friedrich Engels, ami et associé de Karl Marx, dans son ouvrage sur *La Situation de la classe laborieuse en Angleterre* (1845) et par Charles Dickens dans son roman social, *Les Temps difficiles* (1854).

1774

Turgot dirige un gouvernement « éclairé par la science »

Anne Robert Jacques Turgot
1727-1781

Si les gouvernants s'intéressent depuis longtemps au prestige des sciences et à leurs applications, Turgot est le premier, au début du règne de Louis XVI, à appuyer explicitement sa politique sur une doctrine scientifique en voie d'émergence : la science économique.

Redresser les finances

À sa mort, le 10 mai 1774, Louis XV laisse à son petit-fils un royaume qui est dans une situation financière catastrophique. Le 24 août suivant, Louis XVI nomme Turgot au poste de contrôleur général des finances. Pour redresser les comptes de l'État, ce dernier promet qu'il n'y aura ni défaut sur la dette, ni nouveaux emprunts, ni impôts additionnels. Sa recette pour équilibrer le budget ? Libéraliser l'économie et supprimer les privilèges.

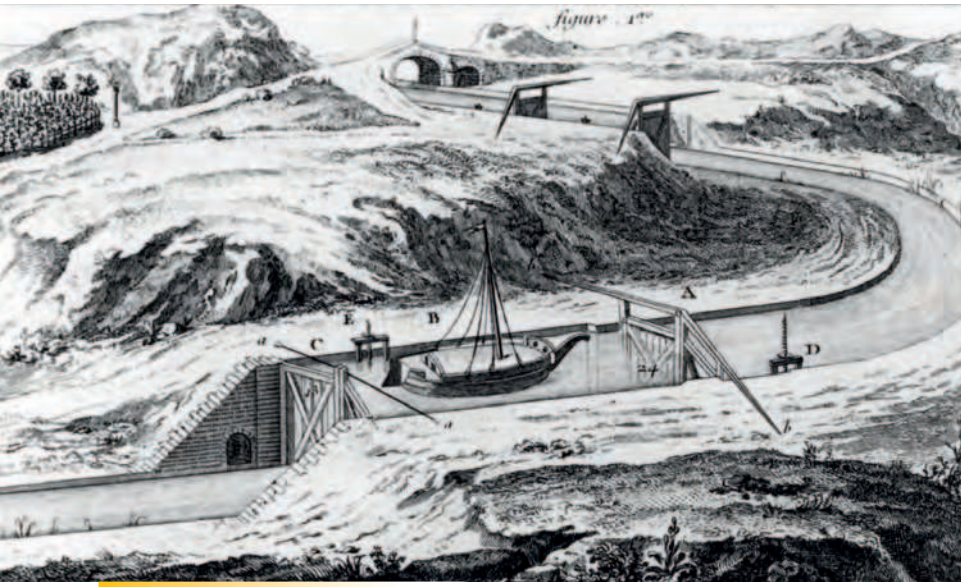
Révolutionnaire

Le projet de Turgot est « révolutionnaire » : il veut abolir les corvées et les remplacer par une taxe unique, soumettre la noblesse et le clergé à l'impôt, libéraliser le commerce et l'industrie… Libéral dans le domaine économique, il l'est aussi dans celui des mœurs et de la pensée : il promet la liberté de conscience aux protestants, un système de poids et mesure unifié (▸ 1791) et un vaste plan d'instruction publique. Il s'entoure de conseillers de l'Académie des sciences (▸ 1666), dont Jean Le Rond d'Alembert, Charles Bossut (1730-1814) et Nicolas de Condorcet (1743-1794), à qui il commande de vastes enquêtes scientifiques pour décider, par exemple, de l'utilité d'un canal en Picardie.

> *« Il ne craignait pas de consulter les savants, parce qu'il ne craignait pas la vérité. »*
>
> Nicolas de Condorcet, *Vie de Monsieur Turgot*, 1786.

Gouverner par la science

Non content de s'appuyer sur l'expertise des savants, Turgot adopte une approche scientifique de l'art de gouverner. Auteur de *Réflexions sur la formation et la distribution des richesses* en 1766, il conçoit son programme de gouvernement comme la mise en œuvre des doctrines de penseurs libéraux, les « physiocrates », qui ont pour ambition de fonder une science de l'économie basée sur l'ordre de la nature. Mais ces réformes se heurtent à des intérêts trop puissants : Turgot est congédié dès le 12 mai 1776.



La France prend corps

La question du canal de Picardie, qui préoccupe Turgot et Condorcet, se pose dans un pays qui prête de plus en plus d'attention à l'aménagement de son territoire. La construction de nouvelles routes et de canaux permet de fluidifier le transport des biens et des personnes. Crée en 1716, le corps des ponts et chaussée prend peu à peu le contrôle de ces problématiques. Ses ingénieurs, formés dans une école établie en 1747, y reçoivent une éducation scientifique solide.

Diderot et D'Alembert, « Hydraulique », tome V des planches, *Encyclopédie*, 1767.

« L'intérêt courant de l'argent est le thermomètre par où l'on peut juger de l'abondance ou de la rareté des capitaux ; il est la mesure de l'étendue qu'une nation peut donner à ses entreprises de culture, de fabrique et de commerce. »

Turgot, *Réflexions sur la formation et la distribution des richesses*, 1766.

La naissance de la science économique

Dans le sillage de l'*Encyclopédie* (► 1751), le médecin François Quesnay (1694-1774) développe une théorie macroéconomique inspirée du modèle de la circulation sanguine (► 1628). Les partisans de ses idées s'appellent les *physiocrates* (du grec *physis*, « nature », et *kratos*, « gouvernement ») : on compte parmi eux Malesherbes, Pierre-Samuel du Pont de Nemours et Mirabeau. Fondé sur l'idée d'un ordre naturel, ce corps de doctrine réfléchit à la détermination du « bon prix » des matières agricoles. Le philosophe écossais Adam Smith (1723-1790) s'en inspire pour fonder l'économie politique avec la publication de *La Richesse des Nations* en1776.

1784

Les académiciens rejettent le magnétisme animal

Franz Anton Mesmer
1734-1815

Tout en séduisant les élites parisiennes par sa supposée maîtrise du magnétisme animal, Mesmer soulève l'opposition de l'*establishment* médical. Une commission royale chargée d'enquête met alors au point des méthodes innovantes pour évaluer l'efficacité de sa thérapie.

Un médecin attirant

Médecin réputé à Vienne, Franz Anton Mesmer développe une pratique médicale basée sur l'existence d'un supposé « fluide magnétique » emplissant l'univers. En 1778, il s'installe à Paris, où ses méthodes de guérison attirent de nombreux patients de la haute société parisienne. Lettres et pamphlets recensent des centaines de guérisons, et le mesmérisme, ou magnétisme animal, devient à la mode dans la capitale.

Malgré le soutien de personnalités influentes comme le médecin Charles Deslon (1738-1786) et la reine Marie-Antoinette, les autorités médicales réagissent violemment à ces méthodes et expulsent de la faculté les médecins partisans de Mesmer. En 1784, le gouvernement met en place une commission royale dans le but d'examiner l'efficacité du mesmérisme. Le chimiste Antoine Laurent Lavoisier (▸ 1789) mène l'enquête aux côtés de quatre médecins de l'université de Paris et de quatre membres de l'Académie des sciences, dont Benjamin Franklin (1706-1790).

Les académiciens mènent l'enquête

La commission examine de nombreux patients prétendument guéris par Mesmer et demande à des adeptes du mesmérisme d'identifier les objets (arbres, verres d'eau, etc.) supposément remplis de « fluide magnétique » par d'autres mesmériens, hors de vue. Considérées comme la première étude scientifique « à l'aveugle » de l'histoire, ces expériences sont dévastatrices pour le mesmérisme : le rapport final conclut que le magnétisme animal n'existe pas et que les guérisons supposées sont le fruit de la suggestion. C'est d'ailleurs à partir de ce moment-là que se répand l'usage du terme *placebo* (du latin, « je plairai »).

Ridiculisé, Mesmer quitte Paris en 1785. Pourtant, certains s'inspirent de son approche. Des émules, comme le marquis de Puysegur, se targuent de guérisons « à travers l'esprit » par des méthodes semblables à l'hypnose, une technique qui sera systématisée dans les années 1840 par l'Écossais James Braid (1795-1860) et popularisée par Jean-Martin Charcot (1825-1893) et son élève Sigmund Freud (1856-1939) à la fin du XIXe siècle.

La haute société se réunit autour du baquet

Les traitements de Mesmer consistent d'abord à appliquer des aimants sur le corps du patient. Plus tard, Mesmer considère ce geste superflu et agit directement par sa présence. Devant l'afflux de patients, il conçoit un « baquet magnétique » destiné à des cures collectives. Le récipient, installé dans son domicile, est censé accumuler du « fluide magnétique » que les patients reçoivent en se saisissant de tiges métalliques.

Séance de baquet de Mesmer dans un salon de la noblesse française au XVIIIe.

Les médecines « alternatives »

Le mesmérisme partage des similarités avec d'autres thérapies, dites « alternatives », qui émergent durant le XIXe siècle et se caractérisent par l'insistance sur l'individualisation des traitements, la popularité auprès des classes supérieures et les conflits avec l'*establishment* médical. On peut citer ici l'homéopathie de Samuel Hahnemann (1755-1843), qui tire son inspiration des effets antipaludiques de la quinine et du succès des vaccins. Elle se base sur un principe de similarité suivant lequel « les semblables sont guéris par les semblables », auquel s'ajoute une préférence pour les traitements en très petites doses. Comme Mesmer, Hahnemann est décrié par la communauté médicale, mais son succès auprès de l'élite fait perdurer ses méthodes jusqu'à aujourd'hui. Un autre exemple est l'hydropathie, codifiée par Vincent Priessnitz (1799-1851), qui consiste à traiter les maladies par l'usage interne et externe de l'eau.

1820 | 1830 | 1840 | 1850 | 1860 | 1870

1822 Déchiffrement des hiéroglyphes par Champollion

1827 Première photographie de Niépce

Première ligne télégraphique aux États-Unis 1843

1848 Marx et Engels, *Manifeste du parti communiste*

1851 Exposition universelle à Londres

1785

Coulomb « pèse » l'électricité

Charles-Augustin de Coulomb
1736-1806

Ingénieur et savant, Charles-Augustin de Coulomb conçoit un appareil de mesure qu'il appelle « balance », susceptible de mesurer la force de répulsion entre deux boules chargées de la même électricité. Il établit ainsi la loi d'attraction et de répulsion des charges électriques.

Curieuse électricité

Les manifestations électriques intriguent et inquiètent depuis longtemps, et nombre d'amateurs éclairés se passionnent pour le sujet au XVIIIe siècle. Les émissions d'étincelles de lumière, l'attraction de petits morceaux de papier ou de feuilles d'or par des tiges frottées sont admirées dans les salons, sur les boulevards et même à la cour du roi. Moines et militaires y forment des chaînes humaines, en se donnant la main, et sursautent en se transmettant de proche en proche une décharge électrique. Donné en spectacle, le phénomène reste toutefois mal expliqué et peu contrôlable. Charles-Augustin Coulomb va alors s'appliquer à mesurer les forces en jeu.

Une « balance » électrique

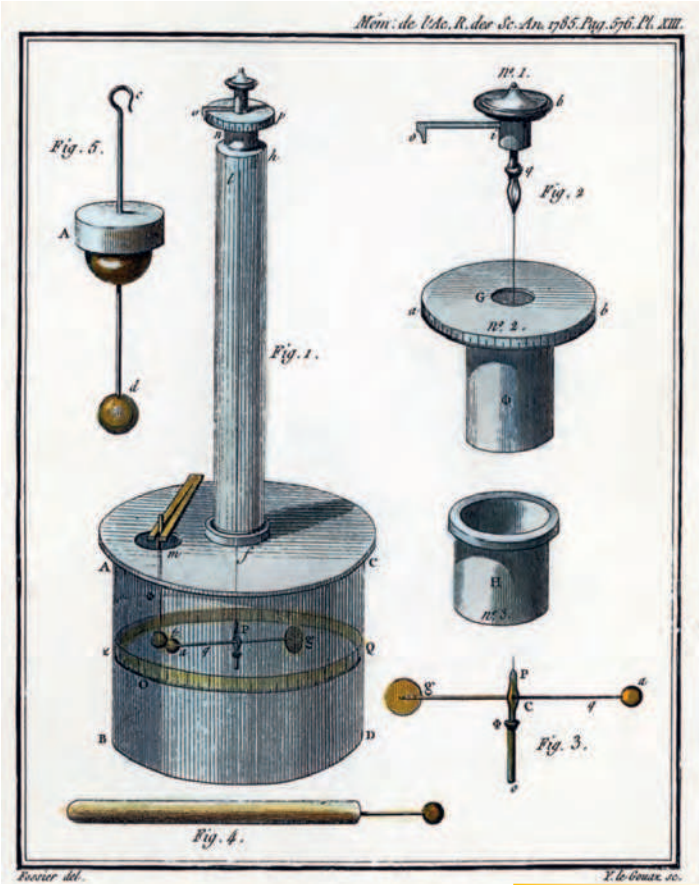
Ingénieur militaire français, Coulomb cherche à appliquer les mathématiques aux sciences de l'ingénieur. Il étudie notamment la torsion des fils et comprend son intérêt pour mesurer des forces de répulsion, comme les forces électriques ou magnétiques.

Newtonien convaincu, il souhaite tester l'intensité de la force électrique qui est pour lui, à l'image de la force de gravitation, une force centrale s'exerçant à distance. Son savoir-faire méticuleux le mène alors, en 1785, à élaborer une « balance » de torsion de « la plus grande exactitude », lui permettant de mesurer l'intensité de répulsion entre deux charges électriques de même polarité.

La naissance de l'électrostatique

Grâce au principe de sa balance, Coulomb soumet à l'analyse mathématique de nombreux effets de l'électricité statique et du magnétisme. Il rédige ainsi sept mémoires entre 1785 et 1789 et énonce la loi de Coulomb. En l'honneur de ces travaux, l'unité de charge électrique sera baptisée, cent ans plus tard, le coulomb (C).

Il faut attendre 1820 pour que Hans Christian Œrsted (▸ 1820) découvre, grâce à la pile de Volta, l'effet inattendu de l'électricité sur une boussole. André Marie Ampère (1775-1836) fonde alors le concept de courant et le domaine de l'électrodynamique.



Une controverse électrique

L'*Encyclopédie* (► 1751) décrit l'électricité comme l'« effet d'une matière très fluide et très subtile » qui se transmet par contact. Mais existe-t-il une ou deux natures de fluides ? L'abbé Nollet (1700-1770), savant expérimentateur, conçoit des « affluences » et « effluences » de fluides de différente nature, et se trouve en cela grandement suivi. D'autres, comme Benjamin Franklin (1706-1790), savant et homme politique américain, considèrent que les effets électriques s'expliquent par excès ou défaut de charges d'une seule nature. Aucune expérience ne permet alors de trancher la question. Il faudra attendre 1897 et l'identification du porteur de charge électrique, l'électron, pour connaître la vraie nature du flux électrique.

La balance de torsion, modèle de précision

Deux petites balles de sureau sont placées à proximité l'une de l'autre dans une enceinte en verre. La première, fixe, électrisée, touche la seconde qui, suspendue à un fil très fin, s'éloigne. En jouant sur la torsion du fil, on oblige les balles à se rapprocher. La torsion, proportionnelle à la force de répulsion, permet d'en mesurer l'intensité. Coulomb montre ainsi que cette force est inversement proportionnelle au carré de la distance des deux charges.

Balance de Coulomb, *Mémoire de l'Académie royale des sciences*, 1785.

1820 | 1830 | 1840 | 1850 | 1860 | 1870

1822 Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*

1824 Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines*

1831 Première dynamo électrique par Faraday

1840 Liebig, *Chimie agricole*

1843 Joule, *Sur l'équivalent mécanique de la chaleur*

1856 Invention du premier colorant artificiel

1869 Tableau périodique des éléments par Mendeleïev

1789

Lavoisier révolutionne la chimie

Antoine-Laurent de Lavoisier
1743-1794

En commençant par l'étude des gaz et des réactions de combustion, Antoine-Laurent de Lavoisier révolutionne la chimie sur la base de la quantification et d'une réforme intégrale de la nomenclature chimique.

La chimie des airs

Dans le premier tiers du XVII^e siècle, l'air commence à être considéré comme un objet de recherche en soi par les chimistes et non plus seulement comme l'environnement au sein duquel se produisent les réactions. Équipés de nouveaux instruments, comme la vasque pneumatique inventée par le botaniste Stephen Hales (1677-1761), les chimistes européens identifient, mesurent et étudient les propriétés d'un grand nombre de nouveaux « airs ».

En 1754, le médecin Joseph Black (1728-1799) décrit ainsi un « air fixe » qui émane de la respiration, de la combustion et de la fermentation (notre dioxyde de carbone). En 1766, Henry Cavendish (1731-1810) isole un « air inflammable » (dihydrogène). Huit ans plus tard, Joseph Priestley (1733-1804) systématise l'étude de ces différents « airs » et, entre 1774 et 1786, isole des gaz comme l'« air nitreux » (oxyde d'azote) ou l'« air déphlogistiqué » (dioxygène).

Un traité révolutionnaire

À Paris, Antoine-Laurent de Lavoisier, jeune membre de l'Académie des sciences, aborde l'étude des nouveaux airs dès 1772. Il commence alors par mettre en doute la théorie standard de l'époque qui explique certaines réactions chimiques, et notamment les combustions, par l'existence d'un fluide inflammable, le « phlogistique ».

Au-delà de la découverte des composants de l'air et de l'eau, qu'il identifie à la suite de ces expériences, les recherches de Lavoisier se caractérisent par la précision des mesures de réactifs et de produits issus de réactions chimiques. Doté d'un des laboratoires de chimie les mieux équipés d'Europe, celui de l'Arsenal à Paris, ses contributions à la chimie sont à la fois techniques, expérimentales et épistémologiques.

Avec la publication de son *Traité élémentaire de chimie* en 1789, Lavoisier réforme les approches de cette discipline. Ce manuel diffuse au sein des nouvelles générations de chimistes une nouvelle nomenclature chimique. Cependant, l'exécution de Lavoisier en 1794, pendant la Terreur, laisse à ses collègues et disciples la tâche de poursuivre cette réforme.

Liaison fructueuse

Marie-Anne Pierrette Paulze est l'épouse de Lavoisier mais aussi sa principale collaboratrice. Ayant suivi des cours d'anglais, de latin, de sciences et de peinture auprès de Jacques Louis David, elle informe son époux des publications étrangères et illustre certains de ses ouvrages comme le *Traité élémentaire de chimie*. Après la Révolution, elle organise la publication de ses derniers mémoires, ainsi que ceux d'autres partisans de la nouvelle chimie.

Jacques Louis David, *Portrait du chimiste français Antoine-Laurent de Lavoisier et de sa femme Marie-Anne Pierrette Paulze*, 1788.

Le nouveau langage de la chimie

Au XVIII[e] siècle, la recherche chimique se heurte à l'absence d'une nomenclature standardisée et cohérente. Le chimiste Torbern Bergman (1735-1784) propose en 1775 l'usage d'une nomenclature binomiale analogue à celle que Linné a conçue pour la botanique (► 1735). En 1786, Lavoisier profite d'une proposition de Louis Bernard Guyton de Morveau (1737-1816), traducteur de Bergman, pour mettre en place, avec ses collègues Claude Louis Berthollet (1748-1822) et Antoine Fourcroy (1755-1809), un projet à l'origine de la nomenclature chimique moderne. Le nouveau langage de la chimie est basé sur une liste de trente-trois éléments ou « corps simples » (comme l'oxygène, l'azote, le fer, etc.), qui sont définis de façon pragmatique comme les substances qu'on ne peut plus décomposer par l'analyse chimique.

1791

La Terre donne naissance au mètre

Le 26 mars 1791, l'Assemblée constituante définit une nouvelle unité de longueur. Fondée sur la dimension de la Terre, elle doit unifier toutes les pratiques locales de mesures à partir d'une démarche rationnelle et universelle.

Le chaos des poids et mesures

L'effondrement de l'empire carolingien laisse aux seigneurs la prérogative de définir eux-mêmes poids et mesures. Du XVI^e^ au XVIII^e^ siècle, toutes les tentatives royales pour reprendre en main le système vont échouer. Les litiges sont alors chose courante sur les marchés ou pour le prélèvement des taxes. Aussi, lorsque Louis XVI consulte les citoyens en vue des états généraux de 1789, ces derniers demandent une réforme des poids et mesures, lassés de mesurer les distances en pouce, toise, perche, lieue… en fonction de leur région. Une lieue de Paris vaut par exemple 600 perches, une perche ordinaire vaut 10/9 de perche du roi, qui vaut elle-même 3 toises soit 6 pieds du roi !

La Terre comme référence

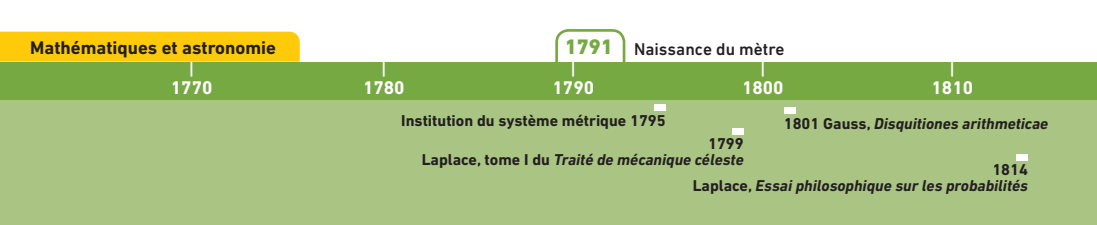
Le 26 mars 1791, pour répondre à ces doléances, l'Assemblée constituante décide de fixer une unité de longueur « naturelle et invariante », « qui ne renferme rien d'arbitraire ni de particulier à la situation d'aucun peuple sur le globe ».

Sous l'impulsion de savants comme Condorcet, Laplace et Lavoisier, le mètre – du grec « mesure » – est défini comme le 10 millionième du quart de méridien terrestre. Cette définition, où la référence terrestre est accessible à tous et n'appartient à personne, répond alors aux idéaux révolutionnaires d'universalité, d'indépendance et d'alliance de toutes les nations.

La difficile adoption du système

Le système métrique décimal est institué le 7 avril 1795, mais suppose une profonde modification des habitudes. Aussi, dans le désordre politique du début du XIX^e^ siècle, les anciennes unités de mesure sont reprises.

C'est une loi de 1840 qui va contraindre les usagers à adopter définitivement ce système de mesure dans le commerce comme dans la vie civile. Certaines pratiques comme l'arpentage, enseigné à l'école primaire à partir de 1816, familiarisent les enfants avec les subdivisions du mètre et vont faciliter la transition.



L'épopée de la mesure du mètre

En 1792, on confie aux astronomes Jean-Baptiste Delambre (1749-1822) et Pierre Méchain (1744-1804) le soin de mesurer, avec une grande précision, la longueur d'un degré d'arc de méridien terrestre. Dans le contexte très troublé de la Révolution française, ils arpentent le terrain durant sept ans entre Dunkerque et Barcelone. De la distance séparant ces deux villes, situées sur le même méridien, et de leurs latitudes, ils déduisent que la nouvelle unité vaut trois pieds onze lignes et deux cent quatre-vingt-seize millièmes. Depuis, la définition du mètre a changé plusieurs fois pour gagner en précision. Il est actuellement défini comme la longueur du trajet parcouru par la lumière dans le vide pendant 1/299 792 458e de seconde.

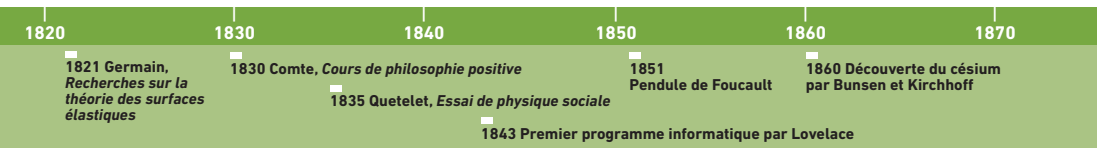
Des unités internationales

En 1875, pour harmoniser l'ensemble des étalons à travers le monde, 17 États signataires décident de créer le Bureau international des poids et mesures lors de la Convention du mètre. Au mètre et au kilogramme s'ajoutent l'unité de temps (la seconde), puis, en 1954, l'unité de courant (l'ampère), de température (le kelvin) et d'intensité lumineuse (la candela). En 1960, l'ajout de la mole clôt la liste.

Présentation des nouvelles mesures du XIXe siècle : le litre (1), le gramme (2) et le mètre (3), gravure de L. F. Labrousse, 1800.

« *Qu'il n'y eût plus qu'une mesure pour tout le royaume, et que les grains et différentes espèces se mesurassent dans une même mesure.* »

Extraits de Cahiers de doléances de Quimper et de Troyes, 1789.



1794

Sophie Germain fait des maths sous un pseudo

Sophie Germain
1776-1831

Empêchée d'assister aux cours de l'École polytechnique, une jeune femme prend l'identité d'un étudiant frileux pour correspondre avec les plus grands mathématiciens de son temps. Son travail lui vaut même un prix de l'Académie des sciences.

Les bancs glacés de Polytechnique

En l'an III, la République française cherche à reconstruire son système d'enseignement supérieur dévasté par la Révolution. Une école, bientôt dite Polytechnique, est créée pour former les ingénieurs de la nation. À dix-huit ans, Sophie Germain, passionnée de mathématiques depuis qu'elle a lu la vie d'Archimède, rêve de l'intégrer. Mais l'école n'accepte pas les femmes. Peu importe, Germain s'acharne. Après tout, elle a déjà étudié, seule, Euclide (▸ – 300) et Newton (▸ 1687). Lorsqu'elle apprend, en 1794, que l'élève Antoine-Auguste Leblanc abandonne sa place, apparemment déçu de la nouvelle école froide et mal éclairée, la solution est toute trouvée. Elle prend son identité et réclame par écrit les notes de cours des professeurs.

La métamorphose de M. Leblanc

C'est donc sous l'identité de Leblanc que Sophie Germain entame une correspondance avec certains professeurs, comme Joseph-Louis de Lagrange (1736-1813). Elle s'attaque au théorème de Fermat, qui affirme que, pour tout entier n supérieur à 2, l'équation $x^n + y^n = z^n$ n'a aucune solution entière. Nul n'arrive à le montrer, et Germain y échoue aussi. Mais, chemin faisant, toujours sous le nom de Leblanc, elle entame une correspondance avec Gauss (▸ 1801), bien étonné un jour d'apprendre que c'est une femme.

> *« Comment vous décrire mon admiration et mon étonnement, en voyant se métamorphoser mon correspondant estimé M. Leblanc. »*
>
> Lettre de C. F. Gauss à Sophie Germain, 1807.

Les sciences tombent en quenouille

La foule est grande, le 9 janvier 1816, quand l'Académie des sciences (▸ 1666, p. 138) se propose de remettre un prix à Sophie Germain pour son mémoire sur la théorie des surfaces élastiques. Si certains ironisent sur le fait que les sciences tombent « en quenouille » (aux mains des femmes), c'est que jamais l'une d'elles n'a eu droit à cet honneur. Intimidée, Sophie Germain n'ose pas venir en personne le réclamer. Ce qui ne l'empêche pas, jusqu'à sa mort, de publier de nombreux travaux sous son propre nom.

Examen des jeunes filles

Près d'un siècle plus tard, la IIIe République organise l'éducation des jeunes filles, bien que séparée de celle des garçons. Une École normale des jeunes filles ouvre à Sèvres en 1881. Les lycées de jeunes filles sont créés en 1883 et les femmes sont admises à l'agrégation, parfois à la suite d'un concours différent des jeunes hommes. Une certaine Liouba Bortniker, d'origine russe, parvient même à être classée seconde au concours général de l'agrégation de mathématiques en 1885.

L'examen des jeunes filles à l'hôtel de ville, Paris, *Le Petit Journal*, 28 juillet 1895.

Mathématiques au féminin

Pour les jeunes femmes attirées par les sciences, il a longtemps été plus facile d'accéder aux mathématiques, qui n'exigent ni équipement dispendieux ni laboratoire, plutôt qu'aux autres disciplines. Plusieurs ont laissé une trace dans l'histoire. Sans remonter à Hypathie (▶ 415), on peut citer les noms d'Émilie Du Châtelet (▶ 1756), Maria Agnesi (1718-1799), Mary Somerville (1780-1872), Sofia Kovalevskaïa (1850-1891), Emmy Noether (1882-1935), etc. À ce jour, Maryam Mirzakhani (1977-2017) est la seule qui, en 2014, ait reçu la médaille Fields, la plus haute récompense en mathématiques.

« Une jeune fille [...] n'a pas hésité à aborder la plus difficile de nos agrégations classiques, celle de mathématiques pures [...]. Elle a obtenu le second rang, presque le premier, avec une supériorité marquée sur les nombreux candidats reçus après elle et dont la plupart vont être chargés des cours les plus importants dans nos lycées. »

Discours de Charles Zévort, à l'inauguration du lycée des jeunes filles du Havre, 1885.

1820 | 1830 | 1840 | 1850 | 1860 | 1870

1821 Germain, ***Recherches sur la théorie des surfaces élastiques***

1830 Comte, ***Cours de philosophie positive***

1835 Quetelet, ***Essai de physique sociale***

1843 Premier programme informatique par Lovelace

1851 Pendule de Foucault

1860 Découverte du césium par Bunsen et Kirchhoff

1796

Un jeune garçon échappe à la variole grâce à une vache

Edward Jenner
1749-1823

Un médecin anglais combat les ravages causés par la variole humaine en inoculant aux gens une variante bovine de la maladie, beaucoup moins virulente. Le principe de la vaccination se diffuse en Europe, puis dans le monde entier.

Un fléau pour l'humanité

Pendant des siècles, la variole, maladie infectieuse d'origine virale caractérisée par l'éruption d'abcès de pus sur la peau, est l'une des principales causes de mortalité chez l'homme (▸ 1493). De la Chine à l'Europe, de façon empirique, les populations s'exposent aux pustules sèches des patients faiblement malades pour s'en protéger. Mais ce procédé de « variolisation » n'est pas sans risque. C'est le médecin anglais Edward Jenner qui, le premier, apporte une solution de protection efficace contre la maladie.

Le secret des laitières dévoilé

Jenner constate que les fermières qui traient des vaches infectées par la variole bovine ne sont jamais touchées par la forme humaine de la maladie. En 1796, il prélève du pus sur la main d'une femme touchée par la variole bovine, moins virulente que la variole humaine, et l'inocule sous la peau des bras du fils de son jardinier. Soumis plus tard à une variolisation classique, le jeune garçon ne montre aucun signe de maladie. Jenner démontre ainsi que l'exposition aux germes de la variole des vaches immunise contre la variole des humains. La vaccination est née.

> *« J'ai donné à l'expression de vaccination une extension que la science, je l'espère, consacrera comme un hommage au mérite et aux immenses services rendus par un des plus grands hommes de l'Angleterre. »*
>
> Louis Pasteur, *Maladies virulentes, virus-vaccins*, 1881.

Vers une éradication de la variole

Cette découverte a bientôt un retentissement mondial. En 1803, s'inspirant de l'expérience de Jenner, l'Espagne organise une « expédition philanthropique de vaccination » pour combattre la variole en Amérique et aux Philippines. L'opération est un succès. Au Royaume-Uni, la vaccination remplace la variolisation en 1840 et en France, la vaccination antivariolique devient obligatoire en 1902. Grâce à un combat acharné à l'échelle planétaire, la maladie est éradiquée en 1980. C'est une première !

La vaccination fait campagne

Près d'un siècle après Jenner, Louis Pasteur (▸ 1859, p. 228) propose le nom de « vaccin », du latin *vacca* qui signifie vache, pour désigner l'agent infectieux qui déclenche une réponse immunitaire et évite une contamination ultérieure. Vers la fin du XIXe siècle, l'emploi de vaccins pour protéger les populations, mais aussi le bétail, devient fréquent. Dans un souci de prévention, des calendriers de vaccination d'enfants sont bientôt établis. Grâce à ces politiques sanitaires, des maladies comme la poliomyélite, la diphtérie ou la rougeole sont aujourd'hui combattues.

Gaston Melingue, *Edward Jenner effectuant la première vaccination contre la variole en 1796*, 1879.

La naissance de l'immunologie moderne

Au milieu du XXe siècle, les mécanismes moléculaires de l'immunité sont élucidés : celui de l'immunité innée et celui de l'immunité adaptative induite par la vaccination. Le biochimiste anglais Rodney Porter (1917-1985) décrit la structure des anticorps, ces protéines chargées de défendre l'organisme contre les substances étrangères. De son côté, le chercheur français Jacques Oudin (1908-1985) met en évidence la spécificité d'action des anticorps face aux maladies, qui change selon les individus et explique les différentes résistances aux infections. La connaissance précise des agents pathogènes (germes, bactéries, virus…) qui engendrent des maladies permet actuellement le développement de vaccins de plus en plus ciblés qui, comme celui contre la grippe, changent d'une année sur l'autre pour s'adapter aux mutations saisonnières des vecteurs des maladies.

1799

Un naturaliste se fait écologue

Alexander von Humboldt
1769-1859

Lors d'un voyage en Amérique du Sud, le naturaliste allemand Alexander von Humboldt réalise des descriptions de paysages inédites. Il ouvre la voie à une nouvelle sensibilité scientifique qui préfigure l'écologie.

La redécouverte de l'Amérique

Avec l'accord du roi d'Espagne, Alexander von Humboldt s'embarque pour un voyage d'exploration dans les colonies américaines, qui ne durera pas moins de cinq ans. Son périple commence au Venezuela, au cours de l'été 1799, et se termine au Mexique, pendant l'hiver 1804.

Humboldt ne cherche pas à échantillonner des productions naturelles pour, plus tard, les hiérarchiser au sein des classifications mais s'intéresse plutôt aux interactions des êtres vivants avec leur milieu. Ce changement d'approche redéfinit la place du naturaliste, qui doit mettre sa compétence scientifique au service de la compréhension globale des paysages.

Une nouvelle lecture de la nature

La démarche de Humboldt fait intervenir les différentes disciplines de l'histoire naturelle en même temps que l'analyse des caractéristiques physiques des sites. Il recueille des données bien précises sur le terrain – température, humidité, relief, hygrométrie, latitude ou composition du sol – pour, ensuite, les mettre en relation. Il les utilise alors pour comprendre le mode de vie des organismes vivants, interpréter les restes fossiles trouvés ou encore expliquer comment les ressources naturelles sont exploitées par les indigènes. Il prend même en considération l'impact des paysages sur la culture et les mœurs des populations locales.

À chaque région ses plantes

L'étude des organismes dans leur milieu, et tout particulièrement des plantes, inspire à Humboldt l'idée de région botanique. Il en décrit quinze : région tempérée, tropicale, montagneuse, etc. L'identification de ces ensembles homogènes entraîne un changement dans la perception de la nature. De l'exubérance végétale des forêts tropicales à l'uniformité des bois de conifères, tous les paysages peuvent désormais être systématisés et expliqués.

Une ascension record

Accompagné du botaniste français Aimé Bonpland (1773-1858), Humboldt parcourt l'Amérique avec un regard curieux qui mélange connaissance scientifique et plaisir esthétique. L'ascension de ce qu'on considère alors comme le plus haut sommet des Andes, le volcan Chimborazo en Équateur, reste l'une des étapes les plus célèbres de leur voyage. En sillonnant les pentes du volcan, Humboldt comprend que latitude et altitude ont des effets similaires sur la végétation.

Friedrich Georg Weitsch, *Humboldt et Aimé Bonpland au pied du volcan Chimborazo*, 1810.

L'émergence de l'écologie

Humboldt cherche des lois générales pour expliquer l'harmonie de la nature et publie en 1855, à la fin de sa vie, *Cosmos, essai d'une description physique du monde*. Cette œuvre, qui réunit des observations sur les étoiles et les comètes, les océans et les climats, les plantes et l'être humain, annonce la naissance d'un nouveau domaine, qu'Ernst Haeckel (1834-1919) baptisera « écologie » en 1866. Tout au long du XX^e^ siècle, la conscience de partager un environnement commun avec l'ensemble des êtres vivants de la planète franchit les limites de la science pour influencer le fonctionnement de nos sociétés, soucieuses de respecter l'environnement.

« C'est dans la beauté absolue des formes, c'est dans l'harmonie et dans le contraste qui naissent de leur assemblage, que consiste ce que l'on nomme le caractère de la nature. »

Alexander von Humboldt et Aimé Bonpland, *Voyage aux régions équinoxiales du Nouveau Continent*, 1814.

1820 — 1830 — 1840 — 1850 — 1860 — 1870

Lyell, *Principes de géologie* 1833

1847 Mesures d'antisepsie de Semmelweis

Humboldt, *Cosmos, essai d'une description physique du monde* 1855

1859 Darwin, *L'Origine des espèces*

Popularisation de la théorie microbienne par Pasteur 1859

1800

Volta invente la pile électrique

Alessandro Volta
1745-1827

Dans le cadre d'une controverse à propos de l'« électricité animale », une forme d'électricité qui, selon Luigi Galvani, est propre aux êtres vivants, Alessandro Volta développe la première pile électrique.

Des grenouilles électriques

En Europe, au XVIII[e] siècle, l'électricité est un phénomène très populaire, dont les effets sur les objets ou le corps humain sont exhibés dans les salons ou les académies. Mais les principes scientifiques de ce phénomène sont encore mal connus (▸ 1785). Luigi Galvani (1737-1798), professeur d'anatomie à l'université de Bologne, en Italie, démontre que les décharges électriques induisent des contractions dans les muscles des cuisses de grenouilles. Ces dernières bougent aussi quand un crochet de cuivre fixé à la moelle épinière est mis en contact avec une barre de fer. Pour Galvani, l'expérience révèle que les tissus possèdent une « électricité animale » propre, responsable de la contraction des muscles. Il publie ses résultats, en latin, en 1791.

De la controverse à la pile

Alessandro Volta, professeur de physique expérimentale à l'université de Pavie, n'est pas convaincu par la théorie de Galvani. Il avance l'idée que chaque métal a une charge intrinsèque d'électricité : le courant est alors produit par le contact entre les deux métaux, sans nul besoin de matière animale. En 1800, pour le démontrer, il empile des disques de cuivre et de zinc, séparés par des morceaux de carton ou de tissu trempés dans une solution saline, et produit ainsi un courant électrique. Il s'agit de la première pile électrique de l'histoire.

Des recherches galvanisées

La pile de Volta permet de produire un courant stable et continu, et devient un instrument de recherche essentiel en physique et en chimie. Ainsi, Humphry Davy (1778-1829), premier directeur du laboratoire de chimie de la Royal Institution à Londres, utilise le courant électrique pour séparer les différents éléments chimiques d'une solution et découvre, en 1807, le sodium et le potassium. De son côté, en 1820, Hans Christian Œrsted met en évidence le rapport entre électricité et magnétisme à l'aide d'une pile et d'une boussole (▸ 1820). Tout au long du XIX[e] siècle, la pile devient aussi un outil incontournable de nouveaux secteurs techniques.

Volta à l'Institut de France

En 1801, Volta se rend à Paris pour présenter sa pile à l'Institut de France. Ses expériences éveillent l'intérêt de Napoléon Bonaparte, qui lui décerne le titre de comte et sénateur du royaume de Lombardie. Il lui accorde également des subventions pour qu'il poursuive ses recherches sur l'électricité.

Nicola Cianfanelli, *A. Volta présente l'expérience de la pile à Napoléon*, Tribune de Galilée au Palazzo Torrigiani, Florence, 1841.

Les applications de la pile

La pile est d'abord utilisée pour la recherche scientifique, mais le développement de piles plus durables et plus puissantes ainsi que la création des premiers moteurs électriques permettent d'envisager d'autres usages à partir des années 1830. C'est dans le domaine des communications que l'usage de la pile est le plus répandu. Impossible, par exemple, de concevoir le développement du télégraphe électrique sans les puissantes batteries qui fournissent les impulsions transmises par le réseau. Les premières piles sont à usage unique. Mais en 1859, le physicien français Gaston Planté (1834-1889) produit la première batterie rechargeable au plomb. Quarante ans plus tard, Waldemar Jungner invente les batteries au nickel-cadmium qui, avec celles au lithium développées dans les années 1980 à partir des recherches de John Goodenough et de Rachid Yazami, alimentent les dispositifs mobiles au début du XXIe siècle.

1820 | 1830 | 1840 | 1850 | 1860 | 1870

- 1822 Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*
- 1824 Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines*
- 1831 Première dynamo électrique par Faraday
- 1840 Liebig, *Chimie agricole*
- 1843 Joule, *Sur l'équivalent mécanique de la chaleur*
- 1856 Invention du premier colorant artificiel
- 1869 Tableau périodique des éléments par Mendeleïev

1801

Gauss minimise les erreurs et retrouve une planète

Carl Friedrich Gauss
1777-1855

À la recherche d'un astéroïde disparu, le mathématicien Carl Friedrich Gauss développe une méthode statistique servant à réduire l'impact des erreurs de mesure sur les calculs théoriques. Il s'agit de la méthode des moindres carrés.

On a perdu une planète !

Le 1er janvier 1801, l'astronome sicilien Giuseppe Piazzi (1746-1826) observe un nouvel astre, puis le perd de vue. Convaincu d'avoir découvert une planète, il en informe ses collègues. Mais avec si peu d'observations, difficile de prédire le mouvement futur de l'astre. On craint l'avoir perdu à tout jamais.

C'est alors qu'un jeune savant d'à peine 24 ans, Carl Friedrich Gauss, utilise une méthode révolutionnaire de son invention pour calculer la position future de la planète. Le 31 décembre 1801, les astronomes confirment la validité des méthodes de Gauss et retrouvent l'astre, en réalité un gros astéroïde qu'on baptisera Cérès.

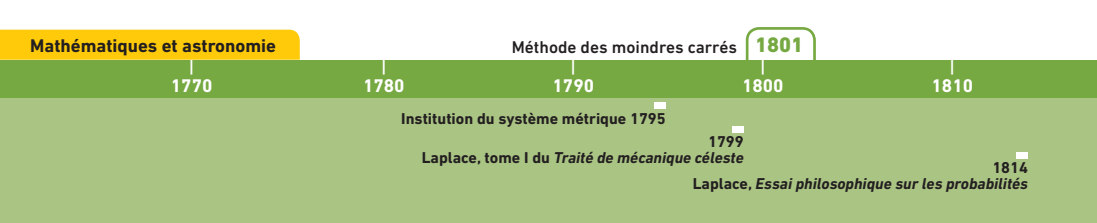
Des erreurs aléatoires, mais probables

Gauss part du principe que chaque observation est nécessairement entachée d'erreurs. Il distingue alors l'erreur ou le biais systématique de l'erreur aléatoire. Si le premier type d'erreur peut être réduit par un meilleur étalonnage de l'appareil, l'erreur aléatoire, elle, ne peut être réduite que par une méthode statistique.

Lorsque les erreurs aléatoires sont indépendantes les unes des autres, les différents résultats de la mesure se répartissent sur une courbe très particulière, en forme de cloche, appelée depuis « gaussienne ». Dans ce cas, la valeur la plus probable de la quantité recherchée est la *moyenne* des mesures, qui correspond au sommet de la gaussienne. Parmi les différentes observations de Piazzi, Gauss choisit donc celles qui minimisent la somme des carrés des erreurs.

Une paternité mise en doute

Gauss ne publie sa théorie des moindres carrés qu'en 1809. Mais, entre-temps, le mathématicien français Adrien Marie Legendre (1752-1833) établit une théorie similaire de manière indépendante. Une longue polémique s'ensuit entre les deux hommes au sujet de la paternité de la méthode, sans que cela l'empêche d'être peu à peu adoptée, grâce au travail de Laplace (▸ 1814), dans toutes les sciences expérimentales.



La planche de Galton

Dans un livre sur l'hérédité, le statisticien anglais Francis Galton (1822-1911) imagine une machine qui permet d'illustrer le théorème dit de la limite centrale. En tombant, les billes frappent divers pitons sur leurs chemins et se répartissent dans les compartiments du bas. Un grand nombre de variations aléatoires indépendantes les unes des autres se distribuent ainsi selon la loi normale trouvée par Gauss.

Machine à probabilités inspirée du dispositif de Francis Galton.

Le prince des mathématiciens

Au cours de l'histoire, plusieurs personnes ont eu droit à l'appellation de « prince des mathématiciens ». Si le surnom est aujourd'hui principalement réservé à Carl Friedrich Gauss, c'est qu'il est l'un des géants de l'histoire des mathématiques. Alors même qu'il s'intéresse à l'astre Cérès, Gauss publie ses *Disquitiones arithmeticae*, un ouvrage de théorie des nombres qui préfigure l'algèbre moderne. Il joue aussi un rôle décisif dans la découverte des géométries non euclidiennes. Directeur de l'Observatoire de Göttingen, Gauss y poursuit un programme de recherches sur le magnétisme terrestre qui l'amène à définir un système d'unités de mesure électromagnétique qui reste le fondement du système international.

« Le calculateur mathématicien [...], par la méthode des moindres carrés, compense les résultats expérimentaux. »

Carl Friedrich Gauss, *Sur un nouveau principe général de la mécanique*, 1829.

1820 | 1830 | 1840 | 1850 | 1860 | 1870

- 1821 Germain, *Recherches sur la théorie des surfaces élastiques*
- 1830 Comte, *Cours de philosophie positive*
- 1835 Quetelet, *Essai de physique sociale*
- 1843 Premier programme informatique par Lovelace
- 1851 Pendule de Foucault
- 1860 Découverte du césium par Bunsen et Kirchhoff

1804

Une faune éteinte reprend vie à Montmartre

Georges Cuvier
1769-1832

Tel un détective, le naturaliste français Georges Cuvier reconstitue les squelettes des animaux disparus grâce à sa connaissance approfondie de l'anatomie des espèces vertébrées.

L'art de la comparaison

Dès la fin du XVIIIe siècle, des ossements fossiles sont régulièrement découverts dans les sous-sols de Montmartre, au cours de l'extraction du gypse. Le naturaliste Georges Cuvier arrive à les identifier grâce à sa méthode d'anatomie comparée. Sa grande connaissance de l'anatomie des espèces actuelles l'aide à identifier celles du passé. Après l'observation minutieuse d'une seule dent, il est capable de décrire son propriétaire, avant même de le sortir de terre ! Lors des fouilles, il attire ainsi une foule de curieux, désireux d'être témoins de son pouvoir de « divination ».

> *« Il faut se rappeler qu'au début de M. Cuvier, la zoologie se contentait de dire le nombre des dents et des doigts. »*
>
> Lettre d'Étienne Geoffroy Saint-Hilaire à Alexandre Brongniart, 1832.

Sur la piste des espèces disparues

En 1804, Cuvier identifie ainsi un petit marsupial fossile, une sarigue, en s'appuyant sur la morphologie de ses dents et d'un os de son bassin. Il démontre alors la pertinence de sa loi de corrélation des formes, selon laquelle le nombre et la forme des os qui composent le squelette d'un animal sont interdépendants. Cuvier publie le fruit de ses réflexions en 1804 dans ses *Leçons d'anatomie comparée* et en 1812 dans ses *Recherches sur les ossements fossiles des quadrupèdes*, un ouvrage pionnier. C'est le coup d'envoi de la paléontologie des vertébrés comme discipline scientifique.

Les révolutions du globe

Cuvier fonde la première galerie d'anatomie comparée du Muséum national d'Histoire naturelle (▸ 1739) et décrit une multitude de vertébrés fossiles. Pour lui, des animaux disparaissent de la surface du globe à cause d'événements catastrophiques. Et après chaque extinction, les espèces rescapées viennent repeupler les régions dévastées, conduisant au développement d'une nouvelle faune. Une conception catastrophiste de l'histoire de la Terre, qui est toujours d'actualité (▸ 1833) dans le domaine scientifique.

Une nouvelle extinction en masse

Le « catastrophisme » de Cuvier est aujourd'hui une théorie scientifique avérée. On sait que notre planète a subi au cours de son histoire plusieurs épisodes ayant entraîné des extinctions massives, celle des dinosaures au Crétacé étant, sans doute, la plus connue. Actuellement, la perte de biodiversité associée à la surpopulation, à la surexploitation des ressources et au réchauffement climatique est considérée par certains comme une nouvelle crise biologique.

Galerie de paléontologie et d'anatomie comparée du Muséum national d'Histoire naturelle de Paris.

Le Napoléon des sciences

Secrétaire de l'Académie des sciences (► 1666, p. 138), professeur à l'École centrale du Panthéon, au Muséum et au Collège de France, Cuvier occupe tous les postes stratégiques en sciences naturelles pendant le Premier Empire et la Restauration. Inspecteur général de l'instruction publique, il est souvent accusé d'avoir retardé l'avènement de l'évolutionnisme en France à cause de ses idées fixistes, supposant que les espèces n'évoluent pas (► 1809). Anatomiste réputé, il réalise l'autopsie de Saartjie Baartman, la « Vénus hottentote », femme bochimane exhibée à cause de son physique singulier.

1820 1830 1840 1850 1860 1870

Lyell, *Principes de géologie* 1833

1847 Mesures d'antisepsie de Semmelweis

Humboldt, *Cosmos, essai d'une description physique du monde* 1855

1859 Darwin, *L'Origine des espèces*

Popularisation de la théorie microbienne par Pasteur 1859

1809

Pour Lamarck, les espèces sont plastiques

Jean-Baptiste de Lamarck
1744-1829

Pour la première fois, la tradition créationniste se voit bousculée par les idées d'un naturaliste français. Jean-Baptiste de Lamarck avance en effet que les espèces se transforment de génération en génération, en raison de leur plasticité.

Cap sur le transformisme

Disciple du botaniste Bernard de Jussieu au Jardin du roi (▸ 1739), Jean-Baptiste de Lamarck s'intéresse en premier lieu aux plantes et publie une *Flore française* en 1778. Cependant, au moment de la création du Muséum national d'Histoire naturelle en 1793, c'est à la chaire dédiée aux animaux à sang blanc que le naturaliste est nommé.

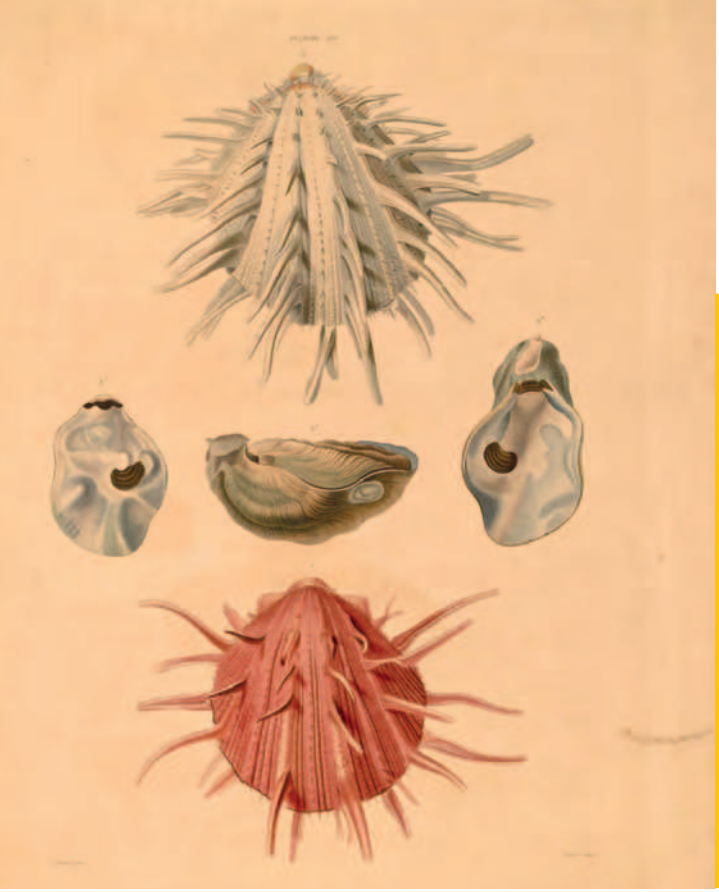
À travers l'étude de cet ensemble d'organismes peu connus, surtout des mollusques, Lamarck conçoit un nouveau cadre de réflexion pour expliquer la diversité du vivant. La comparaison des coquillages fossiles et actuels lui inspire une théorie connue sous le nom de transformisme, qui est publiée dans sa *Philosophie zoologique* en 1809.

Le cou de la girafe

D'après cette théorie, les espèces se transforment au fil du temps pour s'adapter à leur environnement. Les adaptations acquises au cours d'une génération sont alors transmises à la suivante. Le naturaliste explique cette plasticité des espèces par la loi de l'usage et du non-usage des organes, ces derniers ayant tendance à se développer s'ils sont sollicités et à s'atrophier, voire à disparaître, dans le cas contraire. L'exemple de la girafe, dont le cou s'allonge pour atteindre les feuilles les plus hautes, est devenu emblématique des idées de Lamarck.

Une idée condamnée à l'oubli

Théorie révolutionnaire en son temps, le transformisme est mal reçu par la communauté savante. Cette dernière, fortement influencée par la renommée et la toute-puissance de Georges Cuvier (▸ 1804), est en effet partisane de la fixité des espèces depuis la Création. Tout au plus, les naturalistes acceptent-ils une transformation superficielle de la morphologie des êtres vivants sous l'influence de la domestication ou de l'acclimatation. En France, les idées de Lamarck n'ont pas connu de suite. C'est en Angleterre qu'un nouveau paradigme prendra corps dans l'œuvre de Darwin (▸ 1859, p. 230).



Avec ou sans vertèbres

Lamarck met de l'ordre dans le pêle-mêle des animaux à sang blanc en les classant en plusieurs groupes distincts : mollusques, annélides, crustacés, arachnides… Il les rebaptise alors « invertébrés ». Par opposition, les animaux à sang rouge sont désormais appelés « vertébrés ». La présence ou l'absence de vertèbres remplace pour lui la couleur du sang comme premier critère de classification des animaux. Lamarck est également le premier à employer, en France, le terme de « biologie » pour faire référence à l'étude du vivant.

Recueil des coquilles décrites par Lamarck dans son « Histoire naturelle des animaux sans vertèbres » et non encore figurées, 1841.

Un environnement d'influence

Aujourd'hui, l'épigénétique, discipline en plein essor, s'intéresse aux mécanismes qui, sous l'influence de l'environnement, modifient l'expression des gènes sans altérer leur séquence. Le sexe des crocodiles et des tortues dépend par exemple de la température d'incubation de l'œuf. Et les abeilles, qui ont toutes le même patrimoine génétique, deviennent reine ou ouvrière en fonction de la nourriture qu'elles reçoivent au cours de leur développement. L'hérédité n'est plus conçue comme une stricte transmission de gènes au cours des générations, mais comme un mécanisme dynamique sensible aux effets de l'environnement.

« L'influence des circonstances est effectivement, en tout temps et partout, agissante sur les corps qui jouissent de la vie, mais ces effets ne deviennent sensibles ou reconnaissables qu'à la suite de beaucoup de temps. »

Jean-Baptiste de Lamarck, *Philosophie zoologique*, 1809.

1820 — 1830 — 1840 — 1850 — 1860 — 1870

Lyell, *Principes de géologie* 1833

1847 Mesures d'antisepsie de Semmelweis

Humboldt, *Cosmos, essai d'une description physique du monde* 1855

1859 Darwin, *L'Origine des espèces*

Popularisation de la théorie microbienne par Pasteur 1859

1810

Une université moderne voit le jour à Berlin

Wilhelm von Humboldt
1767-1835

La création de l'université de Berlin par Wilhelm von Humboldt marque un jalon important dans l'histoire de l'université moderne, caractérisée par la liberté académique et l'intégration de la recherche et de l'enseignement.

La fin des universités médiévales

À la fin du XVIIIe siècle, les universités restent généralement sous la tutelle de l'Église et conservent une organisation et des pratiques médiévales. Les programmes ne sont pas adaptés à la science moderne et la recherche se fait, le plus souvent, hors les murs, notamment dans les académies des sciences (▸ 1666, p. 138).

Inspirée par la philosophie des Lumières, la Révolution abolit les universités et crée de nouvelles écoles, comme l'École polytechnique ou l'École normale supérieure, qui mettent en avant la science et les techniques modernes. Pourtant, les aléas de la politique française ne favorisent pas la stabilité de ces institutions, qui sont modifiées et rebaptisées à plusieurs reprises.

Humboldt et l'université de Berlin

En Allemagne, un modèle alternatif se développe sous l'égide du philosophe et linguiste Wilhelm von Humboldt, dont le frère, Alexander, est un célèbre naturaliste et voyageur (▸ 1799). Nommé conseiller pour l'éducation au ministère de l'Intérieur de Prusse, il propose en 1809 une réforme complète de l'enseignement supérieur en s'inspirant des idées du théologien et philosophe Friedrich Schleiermacher (1768-1834).

Son projet s'appuie sur les principes de la liberté académique, le libre choix de parcours des étudiants et l'autonomie universitaire, qui doivent mener à une université dédiée à l'éducation générale et au progrès de la connaissance. L'université de Berlin qui ouvre en 1810 est le premier exemple de ce nouveau modèle.

L'expansion du modèle allemand

Les réformes de Humboldt s'imposent en Europe vers la moitié du XIXe siècle. Combinant de manière efficace enseignement, recherches dans des laboratoires bien équipés (▸ 1824) et séminaires vivants, les universités permettent à la Prusse et aux autres États allemands de devenir leaders de la recherche scientifique. Elles inspirent rapidement la Scandinavie et les pays de l'Europe centrale et orientale. Dans les années 1870, le modèle est aussi adopté aux États-Unis et au Japon (▸ 1871).

L'université comme lieu de science

Depuis le XIXe siècle, les universités occupent une place centrale dans la recherche scientifique. L'enseignement universitaire s'accompagne ainsi de travaux pratiques dans les laboratoires et de discussions de haut niveau dans les séminaires. La recherche devient aussi, par le biais de la production de thèses de doctorat originales, un prérequis aux carrières dans l'enseignement supérieur.

Laboratoire d'électrochimie de l'Université de technologie, Munich, fin du XIXe siècle.

L'expansion des universités au XIXe siècle

La crise de l'université à la fin du XVIIIe siècle est mise en évidence par la diminution du nombre d'universités en Europe, qui passent de 143 à seulement 83 entre 1789 et 1815. À l'inverse, le XIXe siècle connaît une vague de création de nouvelles universités. En 1930, on en compte plus de 200, auxquelles on peut ajouter 300 institutions d'enseignement technique supérieur. Après la Seconde Guerre mondiale, de nouvelles réformes sont entamées, induisant une augmentation importante du nombre d'étudiants et d'enseignants pour la recherche universitaire. Les révoltes d'étudiants à la fin des années 1960 accélèrent la démocratisation des universités, qui attirent aujourd'hui la moitié des jeunes entre 18 et 24 ans.

« C'est une particularité des établissements scientifiques supérieurs de toujours traiter la science comme un problème qui n'est pas encore entièrement résolu, et de ne jamais abandonner en conséquence la recherche [...] »

Wilhelm von Humboldt, *Sur l'organisation interne et externe des établissements scientifiques supérieurs à Berlin*, 1809.

1820 | 1830 | 1840 | 1850 | 1860 | 1870

1822 Déchiffrement des hiéroglyphes par Champollion

1827 Première photographie de Niépce

Première ligne télégraphique aux États-Unis 1843

1848 Marx et Engels, *Manifeste du parti communiste*

1851 Exposition universelle à Londres

1814

Laplace décrit un monde où tout est joué d'avance

Pierre-Simon de Laplace
1749-1827

C'est dans un ouvrage de vulgarisation sur la théorie des probabilités que le mathématicien et astronome français Pierre-Simon de Laplace suggère que le cours des événements peut « idéalement » être entièrement prédit par des lois déterministes.

Le probable mouvement des astres

L'un des plus habiles astronomes de son temps, Pierre-Simon de Laplace, est aussi le premier à utiliser tous les ressorts de l'analyse mathématique pour étudier et prédire les mouvements célestes. Laplace démontre ainsi que la théorie de la gravitation d'Isaac Newton (▸ 1687) suffit à rendre compte du mouvement des astres sur une longue durée. Il pense même pouvoir prouver mathématiquement la stabilité du Système solaire.

C'est pour améliorer la précision de ses théories qu'il affine la méthode des moindres carrés inventée par Gauss, celle-ci donnant la valeur la plus probable d'une quantité mesurée par des instruments imparfaits (▸ 1801). Il est au sommet de sa carrière lorsqu'il publie son *Essai philosophique sur les probabilités* en 1814 et avance que les probabilités peuvent s'appliquer « aux questions les plus importantes de la vie », telles que le mouvement des astres, les marées, les saisons, voire les affaires humaines.

La part du hasard

Laplace généralise à tous les phénomènes physiques l'idée newtonienne consistant à exprimer les lois de la nature par des équations différentielles. L'une des caractéristiques principales de ces équations est de décrire l'évolution dans le temps d'un système physique si l'on en connaît l'état initial.

En apportant un fondement mathématique à l'idée de déterminisme déjà présente chez les penseurs du XVIIIe siècle, Laplace donne à croire que le progrès des connaissances permettra un jour de tout prévoir. Tout au moins pour une intelligence fictive qui aurait une connaissance parfaite des conditions initiales et saurait résoudre toutes ces équations. À ce compte, faut-il penser que même nos décisions les plus intimes ne sont que la conséquence d'interactions prévisibles entre molécules ? Tout serait-il joué d'avance ?

Au XXe siècle, la mécanique quantique (▸ dossier, p. 290-291) et le chaos déterministe (▸ 1963) montreront les limites inhérentes au déterminisme laplacien.

Une ascension fulgurante

D'origine modeste, c'est grâce à ses talents de mathématicien que Laplace s'impose dans le monde savant des dernières années de l'Ancien Régime. Il devient membre de l'Académie des sciences à vingt-quatre ans, et son ascension se poursuit pendant la Révolution, l'Empire et la Restauration, qui le fait pair et marquis. Sur ce portrait, on le voit arborer fièrement les attributs du pouvoir impérial, dont la Légion d'honneur.

Guérin Paulin, *Pierre-Simon de Laplace*, 1838.

« Nous devons envisager l'état de l'Univers comme l'effet de son état antérieur et la cause de ce qui va suivre. Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, [...] embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. »

Pierre-Simon de Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, 1814.

Un Newton à la française

Après la Révolution française, Laplace est très vite convaincu que les savants ont aussi pour mission de s'impliquer dans les affaires de la société. Membre de la commission chargée de créer le système métrique en 1791, Laplace s'avère un soutien indéfectible de Napoléon Bonaparte (1769-1821) dont il sera brièvement le ministre. Il cherche à faire diffuser les connaissances et participe avec enthousiasme aux projets pédagogiques de cette période. De son cours à l'École normale de l'an III, il tire l'*Exposé du système du monde* qui rencontre un large succès dans toute l'Europe, au point qu'on le surnomme alors le Newton français.

1820 | 1830 | 1840 | 1850 | 1860 | 1870

1821 Germain, *Recherches sur la théorie des surfaces élastiques*

1830 Comte, *Cours de philosophie positive*

1835 Quetelet, *Essai de physique sociale*

1843 Premier programme informatique par Lovelace

1851 Pendule de Foucault

1860 Découverte du césium par Bunsen et Kirchhoff

1816

Une jeune anglaise imagine une créature artificielle

Mary Shelley
1797-1851

Avec son roman *Frankenstein*, Mary Shelley donne vie à un mythe influent qui exprime nos inquiétudes face à la science moderne.

Une année sans été

En 1816, les pluies se succèdent dans l'hémisphère Nord et les températures plongent anormalement. Et pour cause, l'une des plus violentes éruptions volcaniques de l'histoire s'est produite en Indonésie l'année précédente. Au mois de mai de cette « année sans été », un groupe d'intellectuels et d'amis décide de se retrouver au bord du lac Léman pour y passer l'été.

Composé du médecin John William Polidori (1795-1821), du poète et philosophe Percy Shelley (1792-1822) et de Mary Wollstonecraft Godwin, le groupe séjourne dans une villa appartenant au poète George Byron (1788-1824). Afin d'égayer les journées sombres et pluvieuses, ce dernier propose à chacun d'inventer une histoire de fantômes.

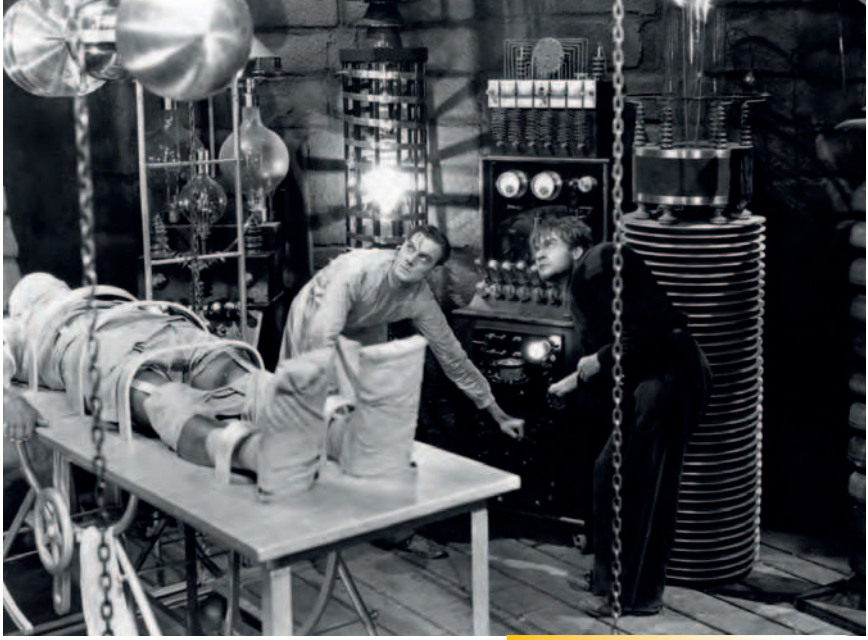
Un conte de terreur gothique

L'histoire de Polidori, baptisée *Le Vampire* et publiée en 1819, marque la première apparition de cette créature dans la littérature de fiction. La jeune Mary, âgée d'à peine seize ans, imagine quant à elle l'histoire d'un certain docteur Viktor Frankenstein qui assemble une créature à partir des corps de plusieurs défunts.

En janvier 1818, Mary, qui a entre-temps épousé Percy Shelley, publie de manière anonyme le roman *Frankenstein ou le Prométhée moderne*, dans lequel elle développe une histoire d'horreur accompagnée de nombreuses réflexions éthiques, philosophiques et politiques.

Un écho à l'image du savant

Frankenstein peut être considéré comme le premier roman de science-fiction moderne, l'étrangeté et l'action étant ici induites par la science et non par des pouvoirs surnaturels. Le roman et ses nombreuses adaptations deviennent une référence incontournable de la représentation populaire des sciences et des savants. Les mésaventures du docteur Frankenstein illustrent autant les espoirs qu'on place dans les découvertes technoscientifiques que les craintes qu'elles suscitent. Elles rappellent aussi aux scientifiques qu'ils doivent assumer la responsabilité de leurs créations.



« *Les maîtres modernes [...] pénètrent dans les recoins de la nature et montrent comment elle procède dans les endroits où elle se cache. Ils montent jusqu'aux cieux ; ils ont découvert la circulation du sang, la nature de l'air que nous respirons. Ils ont acquis des puissances nouvelles et illimitées...* »

Mary Shelley, *Frankenstein ou le Prométhée moderne*, traduit par Germain d'Hangest, 1922.

Les adaptations du roman

Le roman de Shelley, dont le style est très innovant, est aussi bien accueilli par la critique que par le public. Au XIXe siècle, il fait l'objet de plusieurs adaptations théâtrales, qui servent de base aux scénarios de plus d'une centaine de films depuis 1910. Ces adaptations introduisent des personnages (comme l'assistant de Frankenstein) et des thèmes (le savant fou) qui ne sont pas présents dans l'œuvre originale.

Colin Clive et Dwight Frye dans *Frankenstein* de James Whale, 1931.

Entre science et fiction

Le thème du monstre de Frankenstein s'inspire de la science de son temps. Chimiste amateur, Percy Shelley participe d'ailleurs avec Mary à des démonstrations publiques sur les pouvoirs de l'électricité. Ils connaissent probablement les expériences menées en 1803 par Giovanni Aldini, neveu de Galvani (► 1800), au cours desquelles les muscles de criminels exécutés sont activés grâce à l'électricité. En 1818, le médecin écossais Andrew Ure affirme, de son côté, que la stimulation de certains nerfs pourrait ressusciter des personnes asphyxiées ou noyées. Pourtant, ce n'est qu'en 1899 que les médecins genevois Jean-Louis Prévost et Frédéric Batelli montrent, sur des chiens, qu'il est possible de restaurer le rythme normal d'un cœur par des décharges électriques. La première utilisation de cette technique – la défibrillation – sur l'être humain est faite par le chirurgien américain Claude Schaeffer Beck en 1947.

1820

Un apothicaire fait tourner les aiguilles d'une boussole

Hans Christian Œrsted
1777-1851

Lors d'une célèbre expérience, qui révèle l'influence de l'électricité sur une aiguille aimantée, Hans Christian Œrsted ouvre un nouveau champ de recherches qui permettra de lier électricité et magnétisme.

Une leçon privée électrisante

Au début du XVIII[e] siècle, suite à de nombreuses observations de l'aimantation du fer par la foudre, on s'interroge sur l'existence d'un lien entre ces deux « puissances de la nature ». À Copenhague, Hans Christian Œrsted, apothicaire cultivé, nourrit certaines convictions sur « l'identité des forces électriques et magnétiques ». Pour tester ses hypothèses, il réalise des expériences à l'aide de la pile de Volta (▸ 1800).

Lors d'un cours privé donné à des étudiants en 1820, il relie les deux pôles d'une pile et remarque la déviation de l'aiguille d'une boussole posée à proximité. Il mène alors des expériences méthodiques et définit le phénomène comme un « conflit électrique » qui déborde du fil dans un certain rayon et « agit en tournoyant ».

Et le courant électrique fut !

À peine deux mois plus tard, l'expérience est reproduite à Genève devant François Arago (1786-1853), qui la réalise à son tour à l'Académie des sciences de Paris devant André Marie Ampère (1775-1836). Le physicien s'empare du problème et présente rapidement son interprétation.

Ampère introduit alors le concept d'une grandeur physique qui « circule » de façon continue dans le fil branché à la pile. À l'aide du dessin d'un « bonhomme », il prédit le sens de déviation de l'aiguille, et considère que le fil est traversé par un fluide qu'il appelle « courant électrique ».

Deux visions complémentaires

Que l'on considère comme Ampère que l'aimantation de l'aiguille, dans l'expérience d'Œrsted, est le résultat de minuscules boucles de courant, ou comme Jean-Baptiste Biot (1774-1862), que chaque morceau de fil conducteur se comporte comme un aimant, force est d'admettre qu'il existe un lien entre magnétisme et électricité. Pour Ampère, ce sont deux formes d'un même phénomène, à l'origine d'un nouveau domaine, celui de l'électrodynamique.

La nouvelle idée d'une circulation électrique

Avant 1820, on ne connaît de l'électricité que les effets de son stockage et de ses décharges (l'électrostatique). L'idée, proposée par Ampère, d'un fluide qui circule dans le conducteur, donne naissance à l'électrodynamique. Ce concept se révèle très fructueux et ouvre la voie à la science des circuits électriques dont les formules sont toujours employées, bien que l'on sache aujourd'hui voir le phénomène électrique comme une onde qui se propage dans le conducteur.

Œrsted réalisant son expérience, *Les Merveilles de la science* de Louis Figuier, 1867.

Entre doute et surprise

Le résultat obtenu par Œrsted prend la communauté scientifique par surprise. Dans un premier temps, les physiciens sont réticents à l'admettre, notamment à cause de la vision romantique des sciences que défend le scientifique. Très à la mode dans le monde germanique, cette *Naturphilosophie* postule *a priori* une unité profonde des phénomènes de la nature. Mais la curiosité des physiciens est piquée par la mise en évidence d'une force de nature différente de celles observées jusque-là entre masses ou charges électriques (► 1785). Pour la première fois, au lieu d'être attractive ou répulsive, la force exercée par le courant électrique sur la boussole agit perpendiculairement à la distance qui les sépare. Voilà de quoi exercer leur sagacité !

1820 Naissance de l'électrodynamique

1820 — 1830 — 1840 — 1850 — 1860 — 1870

1822 Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*

1824 Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines*

1831 Première dynamo électrique par Faraday

1840 Liebig, *Chimie agricole*

1843 Joule, *Sur l'équivalent mécanique de la chaleur*

1856 Invention du premier colorant artificiel

1869 Tableau périodique des éléments par Mendeleïev

1824

Un inventeur élabore le « système américain de production »

John Hall met au point une nouvelle méthode de fabrication, qui se fonde sur l'interchangeabilité des pièces, dans un arsenal de l'armée américaine. Ce système de production est repris par de nombreuses industries aux États-Unis au cours du XIXe siècle.

Une idée venue de France

Jusqu'au début du XIXe siècle, les produits fabriqués dans la même usine sont faits de composants qui sont tous différents les uns des autres. Jean-Baptiste de Gribeauval (1715-1789), lieutenant-général de l'armée française, est le premier à promouvoir l'interchangeabilité des pièces afin que les fusils et les canons soient plus faciles à réparer.

Ce concept, importé aux États-Unis par des officiers français, est adopté par l'armée américaine en 1815. Mais il s'avère difficile à mettre en œuvre, la précision de mesure et la reproduction des pièces à l'identique restant complexes. Aussi le département des matériels prête-t-il une oreille attentive à John Hall, inventeur d'un nouveau fusil, quand celui-ci propose de fabriquer cette arme avec des pièces interchangeables.

Les innovations de John Hall

En 1819, l'armée commande mille fusils à John Hall et l'autorise à utiliser son arsenal d'Harpers Ferry en Virginie pour les produire. À Harpers Ferry, Hall fait trois inventions qui rendent possible l'interchangeabilité des pièces. Il fabrique des machines-outils spécialisées, notamment des fraiseuses, pour les usiner. Il conçoit des gabarits qui permettent de mesurer les pièces pendant leur fabrication. Enfin, il développe une nouvelle technique afin de positionner les pièces de façon identique sur toutes les machines. Dès 1824, sa méthode de production est bien au point.

Le « système américain de production »

À partir des années 1830, la grande majorité des industriels faisant des revolvers et des fusils aux États-Unis adoptent le système de production de Hall. Ces techniques sont ensuite reprises par des entreprises produisant du matériel agricole, des montres, des machines à coudre et des bicyclettes. L'industrie automobile sera la dernière à adopter ces techniques. Celles-ci sont connues en Europe sous le nom de « système américain de production » à partir du milieu du XIXe siècle.

Techniques et culture

1770 | 1780 | 1790 | 1800 | 1810

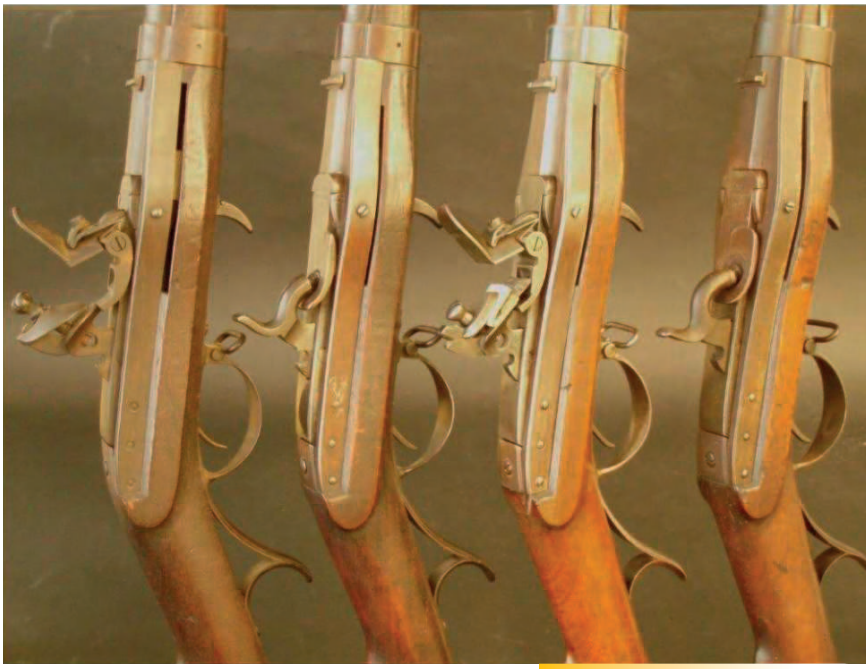
1769 Brevet de la machine à vapeur par Watt

Premier vol en montgolfière 1783

Métier à tisser de Jacquard 1801

Création de l'université de Berlin 1810

Shelley, *Frankenstein ou le Prométhée moderne* 1816



Coup d'envoi de la production

Pendant les années 1830, les fusils inventés par John Hall sont produits à l'identique dans l'arsenal d'Harpers Ferry et l'usine de Simeon North dans le Connecticut. Ils ont la particularité d'être rechargeables par la culasse. Ils sont largement utilisés pendant la guerre de Sécession.

Fusils fabriqués avec des pièces interchangeables par John Hall et Simeon North, 1831-1838.

Vers la production de masse

À la Ford Motor Company, Henry Ford (1863-1947) et ses ingénieurs reprennent les deux principaux aspects du système américain de production : les pièces interchangeables et les machines spécialisées. En 1913, ils y ajoutent la chaîne d'assemblage qui permet la fabrication de produits standardisés en très grande quantité et à très bas coûts. Afin de fidéliser la main-d'œuvre sur ces lignes de production, Ford augmente le salaire des ouvriers. Ces derniers gagnent cinq dollars par jour, un salaire très élevé pour l'époque. Ce sont les débuts de la production de masse.

1824 Système américain de production

1820 — 1830 — 1840 — 1850 — 1860 — 1870

1822 Déchiffrement des hiéroglyphes par Champollion

1827 Première photographie de Niépce

Première ligne télégraphique aux États-Unis **1843**

1848 Marx et Engels, *Manifeste du parti communiste*

1851 Exposition universelle à Londres

1824

Justus Liebig enseigne la chimie sur la paillasse

Justus Liebig
1803-1873

En combinant enseignement et recherche, Justus Liebig transforme une université de province en un véritable centre d'innovation en chimie. Ce nouveau modèle sera diffusé dans le monde entier par ses étudiants.

Une université de province innovante

Après avoir passé un an et demi à Paris, où il devient le protégé d'Alexander von Humboldt (▸ 1799), le jeune Justus Liebig est nommé, en 1824, professeur de chimie à l'École de pharmacie de l'université de Giessen. Il y établit un laboratoire destiné à l'enseignement pratique de la chimie. Avec l'appui du gouvernement de l'État de Hesse, et profitant du contexte de la réforme universitaire dans les États allemands (▸ 1810), Liebig réussit à mettre en place, dans le domaine de la chimie organique (chimie du carbone et de ses composés), un enseignement innovant basé sur les travaux pratiques de laboratoire.

Apprendre en expérimentant

Liebig confie ainsi à ses étudiants des sujets de recherche originaux, qui les amènent à se familiariser avec les techniques d'analyse de composés organiques, notamment avec l'usage d'un instrument de son invention, le *Kaliapparat*.

Parallèlement, Liebig développe un programme de recherches en chimie agricole. Ainsi, ses étudiants analysent les cendres de matière végétale pour comprendre le rôle des minéraux dans la physiologie des plantes, et étudient les protéines des tissus et excréments d'animaux pour comprendre comment fonctionne la digestion. Plusieurs de ces recherches sont publiées dans une revue qu'il a fondée, les *Annalen der Chemie und Pharmacie*, qui devient l'une des plus prestigieuses en Europe.

Un modèle qui s'exporte

Le laboratoire universitaire de Giessen attire des étudiants du monde entier. De 1824 à 1852, Liebig supervise plus de sept cents étudiants. Certains d'entre eux deviennent professeurs de chimie et diffusent son modèle d'enseignement à travers le monde. Les programmes d'institutions, comme l'université Harvard, le Royal College of Chemistry de Londres ou l'université de Leipzig, s'appuient sur ce précédent.

Le laboratoire de Liebig à Giessen

Le prestige et le charisme de Liebig, ainsi que des frais d'inscription réduits grâce à une subvention de l'État, attirent les meilleurs étudiants dans son laboratoire. Sur cette gravure, on peut apercevoir Liebig à l'arrière-plan, observant l'activité des étudiants par une porte entrouverte.

Laboratoire de chimie de Justus Liebig à l'université de Giessen, 1842.

« Un bon chimiste est quelqu'un qui sait voir, sentir, penser en termes de phénomènes ; qui sait garder en mémoire les sensations liées aux expériences et aux produits qu'il a manipulés par le passé. »

Liebig cité par Bernadette Bensaude-Vincent et Isabelle Stengers, *Histoire de la chimie*, 1993.

Le succès de la chimie allemande

La puissance et la nouvelle organisation de son système universitaire font de l'Allemagne un leader dans le domaine scientifique à la fin du XIXe siècle. Les universités attirent des étudiants du monde entier et stimulent le développement industriel. Dans le domaine de la chimie, les étudiants de Liebig font carrière dans des secteurs industriels, comme celui des alcalis (blanchissement), des engrais ou des dérivés du pétrole. L'un d'entre eux, August Wilhelm von Hofmann (1818-1892), met en place à Londres une école de recherche sur les composés organiques, inspirée du modèle de Liebig. C'est là que William Perkin obtient le premier colorant artificiel produit à échelle industrielle, la mauvéine (► 1856).

1824 Enseignement innovant en chimie de Liebig

1820 — 1830 — 1840 — 1850 — 1860 — 1870

1822 Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*

1824 Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines*

1831 Première dynamo électrique par Faraday

1840 Liebig, *Chimie agricole*

1843 Joule, *Sur l'équivalent mécanique de la chaleur*

1856 Invention du premier colorant artificiel

1869 Tableau périodique des éléments par Mendeleïev

1830

Auguste Comte donne des cours d'astronomie populaire

Auguste Comte
1798-1857

Pour Auguste Comte, la compréhension des sciences ne doit s'appuyer que sur l'observation des faits. Pour faire la promotion de cette nouvelle approche philosophique, il développe un enseignement d'astronomie populaire.

Positivement rebelle

Admis à l'École polytechnique en 1814, Auguste Comte fait de brillantes études. Mais son caractère rebelle lui attire des ennuis et il se fait expulser de l'établissement avec l'ensemble de sa promotion. Suivent des années difficiles, au cours desquelles il devient secrétaire du comte Henri de Saint-Simon (1760-1825) et découvre grâce à lui une vision de la société industrielle à l'origine du socialisme. Dès 1829, Comte s'en inspire pour développer un nouveau système de pensée, en rupture avec la tradition, basé sur les faits, et qu'il appelle la « philosophie positive ».

L'astronomie pour les ouvriers

Après un premier essai de cours publics infructueux, Comte estime que son message sera mieux reçu s'il s'appuie sur l'astronomie. Un dimanche après-midi de novembre 1830, quelques mois à peine après la révolution de Juillet, il commence donc des cours d'astronomie populaire. Pour toucher un large public, y compris les ouvriers, les cours sont gratuits et se dispensent de sophistications mathématiques. Et s'il existe plusieurs cours publics à Paris à cette époque, dont les célèbres leçons d'astronomie de François Arago (1786-1853), l'enseignement de Comte se démarque par son ambition philosophique.

Les trois âges de l'humanité

Pour Comte, tous les savoirs scientifiques passent par trois stades de développement. Ils commencent par les stades théologique et métaphysique, avant d'atteindre l'âge positif, c'est-à-dire fondé rationnellement sur les faits observés. Dans le *Cours de philosophie positive*, il aborde, selon une échelle de complexité, l'astronomie puis les sciences physiques, chimiques et biologiques, avant de décrire ce que devraient être les sciences de la société pour lesquelles il crée le néologisme de « sociologie ». Par la suite, Comte développe, sur cette base, une pensée religieuse et cherche à fonder une religion de l'humanité.

> *« On ne connaît pas complètement une science tant qu'on n'en sait pas l'histoire. »*
>
> Auguste Comte, *Cours de philosophie positive*, 1830.

Mathématiques et astronomie

1770 — 1780 — 1790 — 1800 — 1810

Institution du système métrique 1795

1799 Laplace, tome I du *Traité de mécanique céleste*

1801 Gauss, *Disquitiones arithmeticae*

1814 Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*

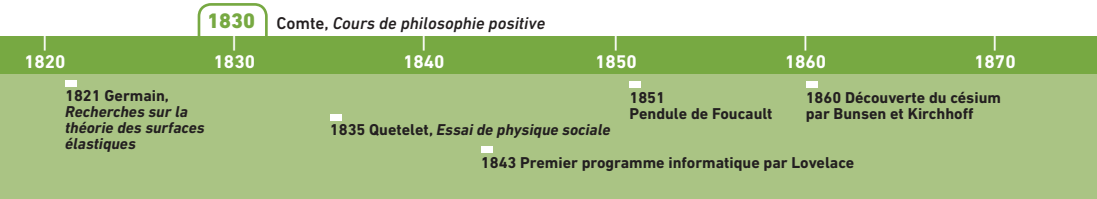
Positivisme

L'épistémologie est la branche de la philosophie qui cherche à porter un regard critique sur la méthode scientifique. Le positivisme postule que le progrès de l'esprit humain l'amène peu à peu à se détacher de la recherche des causes premières des phénomènes pour se consacrer à celle des lois de la nature, exprimées en langage mathématique, par le moyen d'expériences et d'observations répétées. Malgré ses dérives religieuses, le positivisme aura une grande influence sur l'épistémologie. Dans les années 1920, un groupe de scientifiques et philosophes autrichiens forment le Cercle de Vienne et s'en inspirent pour promouvoir l'empirisme logique, selon lequel seule la connaissance basée sur des observations empiriquement vérifiables est réellement scientifique.

L'astronomie, un modèle à suivre

Pour Comte, l'astronomie est la seule science à avoir atteint le stade ultime du développement philosophique. Débarrassée des explications théologiques et métaphysiques, elle s'appuie sur les observations pour proposer des lois mathématiques qui ne s'intéressent plus au « pourquoi » des choses, mais seulement au « comment ». Tout comme Newton qui énonce la loi de la gravitation universelle, sans forger d'hypothèse pour chercher à l'expliquer (▸ 1687).

Globes ayant appartenu à Auguste Comte, Maison d'Auguste Comte, Paris.



1833

Charles Lyell vieillit la Terre de centaines de millions d'années

Charles Lyell
1797-1875

Le XVIIIe siècle commence à mettre en doute l'âge biblique de la Terre. En étudiant les phénomènes géologiques sous un jour nouveau, le Britannique Charles Lyell fait résolument passer l'âge de la Terre de quelques milliers à plusieurs centaines de millions d'années.

Les temps changent !

Tandis que les Grecs conçoivent une Terre éternelle, maintenue dans un équilibre perpétuel, la Bible impose à l'Occident latin la notion de création du monde. La chronologie des générations de prophètes fait remonter, l'origine de la Terre, au plus loin à 7 000 ans avant la naissance du Christ, dans une histoire ponctuée par maints événements catastrophiques.

Au XVIIIe siècle, certains scientifiques envisagent une histoire terrestre plus paisible et déjà bien plus longue. Considérant le temps qu'il a fallu pour que l'océan devienne salé, Edmond Halley (1656-1742) rejette l'idée d'une Terre n'ayant que quelques milliers d'années. L'ingénieur Henri Gautier (1660-1737) constate la lenteur de l'érosion et de la sédimentation et avance, lui, un âge d'environ 35 000 ans.

La Terre vieillit tranquillement

À la fin du XVIIIe siècle, le géologue James Hutton (1726-1797) s'oppose au catastrophisme (▸ 1804) et adopte l'idée d'un monde qui n'a « ni début ni fin », lentement façonné par les mêmes processus : érosion des montagnes, dépôts par sédimentation, mouvements de terrain, etc. Mais sa *Théorie de la Terre*, parue en 1788, reste confidentielle.

Dans les *Principes de géologie*, parus en 1833, Charles Lyell reprend la vision de Hutton et la popularise sous le nom d'uniformitarisme. À partir d'observations de terrain, il apporte la preuve de l'existence d'un temps géologique long de plusieurs centaines de millions d'années et donc d'une Terre tout aussi ancienne. Charles Darwin (▸ 1859, p. 230), le soutient, évaluant à plus de trois cents millions d'années l'âge de la formation rocheuse qu'il étudie dans le sud-est de l'Angleterre.

Avec la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel (▸ 1898), il devient possible de dater les roches grâce à la décomposition isotopique de certains atomes. L'âge de la Terre est alors estimé à 40 millions d'années en 1906, puis à 2,5 milliards d'années en 1938, et enfin à 4,55 milliards d'années aujourd'hui (▸ 1949).

« *Les lois qui ont présidé aux changements de la surface terrestre sont beaucoup plus uniformes qu'[on] ne l'avait imaginé.* »

Charles Lyell, *Principes de géologie*, 1833.

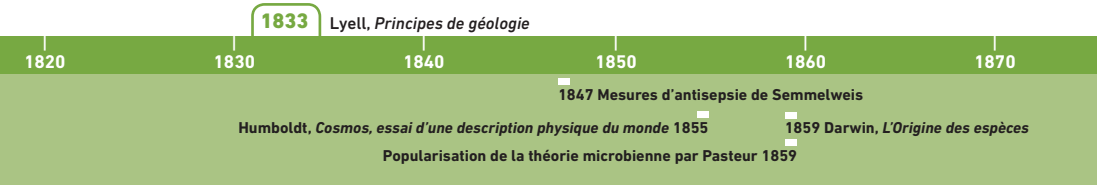
Les *Principes de géologie* de Lyell

Pour Lyell, l'histoire de la Terre est enregistrée dans les paysages. Dans son ouvrage, il constate des ressemblances entre la nature et la structure de dépôts récents, obtenus par dragage de l'Adriatique, et celles de divers dépôts anciens italiens. Il en conclut la similarité et la lenteur des processus de formation des couches géologiques à travers le temps, et définit ainsi les principes d'uniformitarisme et d'actualisme.

Vue de la Valle del Bove, Etna, *Principes de géologie* de Charles Lyell, 1833.

Physiciens contre géologues

En 1778, Georges Louis Leclerc de Buffon (▶ 1739) est le premier à quantifier l'âge de la Terre sans faire référence aux récits bibliques. Connaissant le temps de refroidissement des boulets de canon, il extrapole cette mesure à la Terre tout entière et propose un âge d'environ 74 000 ans. Un siècle plus tard, le physicien lord Kelvin fait un calcul à partir de l'équation de la chaleur. Son résultat, de 20 à 400 millions d'années, entre en conflit avec les convictions des géologues qui évaluent des temps bien plus longs, en raison de la lenteur des phénomènes d'érosion et d'évolution. Kelvin ne s'est pourtant pas trompé dans ses calculs, mais dans ses hypothèses. En effet, il suppose une Terre rigide et homogène, et ignore la dynamique de l'intérieur de la Terre, notamment qu'une convection anime la profondeur du globe et transporte la chaleur vers la surface (▶ 1968, p. 322).



1835

Adolphe Quetelet invente l'homme « moyen »

Adolphe Quetelet
1796-1874

Le XIXe siècle est le siècle de la quantification : porté par les succès de la physique, on y mesure tout. Adolphe Quetelet envisage alors une physique sociale étudiant la régularité des caractères humains et des phénomènes sociaux.

Une effrayante régularité

Au début du XIXe siècle, la « statistique » est d'abord, comme l'indique son étymologie, la science de l'État et du gouvernement des populations. En Angleterre, dès le XVIIIe siècle, puis en France, les bureaux de statistiques produisent déjà de vastes ensembles de données dans le cadre de recensements, de l'état civil, de l'armée, des prisons, etc. Frappé de « l'effrayante régularité avec laquelle les crimes se produisent », année après année, Adolphe Quetelet se demande s'ils ne pourraient pas être étudiés par le biais des mathématiques.

De l'astronomie à la société

Directeur de l'observatoire de Bruxelles, Quetelet s'inspire des méthodes en vigueur en astronomie. Dans sa *Théorie analytique des probabilités*, Laplace (▸ 1814) suggère déjà que les moyens qui permettent de mathématiser le hasard pourraient s'appliquer à la vie humaine. En étudiant un groupe de cinq mille soldats écossais, Quetelet constate que leurs mensurations se répartissent de façon symétrique autour d'une valeur moyenne, selon une courbe en forme de cloche qui suit la loi normale de Gauss (▸ 1801). Il conçoit alors l'idée d'un homme « moyen », de taille égale à la moyenne des tailles, de poids moyen, de tour de poitrine moyen, etc.

Vers une physique sociale

Quetelet se penche ensuite sur les facultés intellectuelles humaines et les données sociales, qu'il mesure, regroupe et moyenne : de la grande stabilité des résultats obtenus il déduit que la société possède des lois propres susceptibles d'être étudiées par une science qui lui serait dédiée. Il consigne alors les bases de cette « physique sociale » – nommée « sociologie » par Auguste Comte (▸ 1830) – dans un ouvrage intitulé *Sur l'homme et le développement de ses facultés* qui paraît en 1835. Cette approche mathématique des lois de la société bouleverse le sens qu'on donne au mot « statistique ».

Mathématiques et astronomie

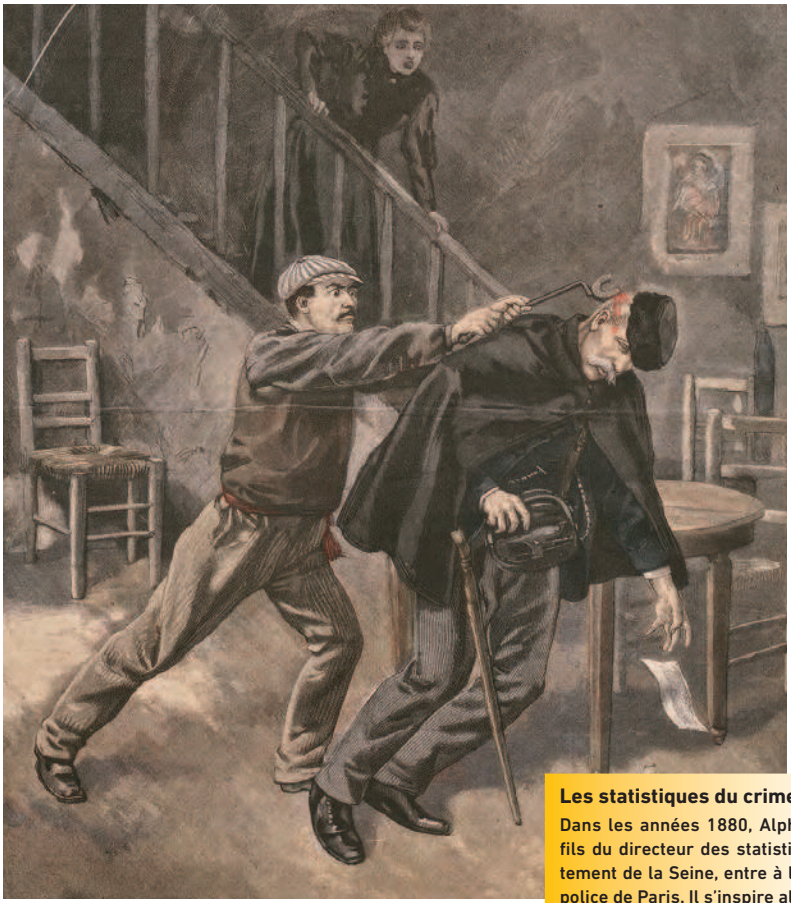
1770 | 1780 | 1790 | 1800 | 1810

Institution du système métrique 1795

1799 Laplace, tome I du *Traité de mécanique céleste*

1801 Gauss, *Disquitiones arithmeticae*

1814 Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*



Les statistiques du crime

Dans les années 1880, Alphonse Bertillon, fils du directeur des statistiques du département de la Seine, entre à la préfecture de police de Paris. Il s'inspire alors des travaux statistiques de Quetelet pour proposer un système d'identification anthropométrique des criminels. Aujourd'hui encore, l'usage de la biométrie permet aux États de mieux contrôler les populations.

Le Petit journal, 26 décembre 1897.

Des statistiques en séries !

Ce n'est que progressivement, au cours du XIX^e^ et au début du XX^e^ siècle, que les statistiques deviennent véritablement une branche des mathématiques dédiée aux méthodes d'analyse des données. Les travaux de Francis Galton (1822-1911), Karl Pearson (1857-1936) et Ronald Fisher (1890-1962) produisent des concepts clés et des critères d'étude, comme le coefficient de corrélation ou le test du χ^2. Cet ensemble de méthodes est couramment utilisé de nos jours en biologie, en médecine, en sociologie ou en psychologie.

« L'homme naît, se développe et meurt d'après certaines lois qui n'ont jamais été étudiées dans leur ensemble ni dans le mode de leurs réactions mutuelles. »

Adolphe Quetelet, *Sur l'homme et le développement de ses facultés*, 1835.

1835 Quetelet, *Sur l'homme et le développement de ses facultés*

1820 — 1830 — 1840 — 1850 — 1860 — 1870

1821 Germain, *Recherches sur la théorie des surfaces élastiques*

1830 Comte, *Cours de philosophie positive*

1843 Premier programme informatique par Lovelace

1851 Pendule de Foucault

1860 Découverte du césium par Bunsen et Kirchhoff

1843

Un brasseur associe mouvement et chaleur

James Prescott Joule
1818-1889

En montrant que le mouvement d'un liquide produit une augmentation de sa température, James Joule bouleverse les conceptions concernant la chaleur.

De l'avantage d'être brasseur

Une fois ses études achevées, James Joule travaille dans la brasserie familiale. Voulant s'assurer que le remplacement des machines à vapeur par des moteurs électriques est rentable, le jeune homme réalise une série de mesures à l'aide des thermomètres de brassage de bière de haute précision. Ces mesures lui suggèrent alors que diverses formes d'énergie peuvent se convertir entre elles. Dès 1840, il établit le lien entre l'échauffement d'un conducteur électrique et le courant le parcourant. C'est ce qu'on nommera plus tard l'« effet Joule ».

Rien ne se perd, tout se transforme

En 1843, il présente à la British Association for the Advancement of Science une expérience permettant d'évaluer le coefficient de proportionnalité entre un travail mécanique et l'élévation de chaleur qu'il produit dans un liquide. Mais son idée est froidement accueillie… À l'époque, la théorie du calorique, émise par Lavoisier en 1783, est la plus communément admise. Elle décrit la chaleur comme un fluide impondérable et indestructible s'écoulant du chaud vers le froid, pénétrant solides et liquides. Ainsi la chaleur ne se crée ni ne se perd, donc elle ne se convertit pas. Aussi, la thèse de Joule montrant que la chaleur peut être issue d'une conversion est difficilement acceptée.

Aux origines de la thermodynamique

Joule précise ses expériences pour affiner la valeur de son « équivalent mécanique de la chaleur ». De ce concept va découler l'idée d'un principe de conservation de l'énergie qui est formalisé en 1845 par Julius Robert von Mayer (1814-1878) comme premier principe de la thermodynamique, nouvelle science de la chaleur.

Ce principe, adjoint à celui de Sadi Carnot (1796-1832), interprété comme la loi d'augmentation de l'entropie par Rudolf Clausius (1822-1888), pose les fondements de la thermodynamique . Ses lois régissent le fonctionnement des systèmes dans lesquels intervient la notion de température (appareils frigorifiques, pompes à chaleur, compresseurs, etc.).

L'expérience de Joule

Un système de poulies permet à deux masses, en tombant, de faire tourner les ailettes placées dans le cylindre rempli d'eau et calorifugé. Le liquide s'échauffe. C'est en mesurant de façon très précise cette élévation de température que Joule quantifie le rapport qui existe entre le travail mécanique, produit par la chute des deux masses, et la quantité de chaleur apportée au liquide. Il annonce pour ce facteur de conversion, nommé équivalent mécanique de la chaleur, une valeur très proche de la valeur actuelle (4,185 J/cal).

Reproduction de l'expérience de Joule par Heinz Otto Sibum dans les années 1990.

La naissance de l'énergie

De longue date, le principe métaphysique d'un invariant est recherché en physique. En 1644, Descartes affirme que le Créateur conserve ce qu'on appelle la quantité de mouvement. Leibniz, lui, considère en 1692 que c'est la « force motrice » ou force vive (*vis viva*) qui est conservée en mécanique. Concernant les manifestations thermiques, Laplace et Lavoisier proposent de changer « les mots de chaleur libre [...] [en] ceux de force vive ». Grâce à la convergence des idées d'une dizaine de savants de différentes spécialités, le concept d'« énergie » – proposé en 1847 par Hermann von Helmholtz – s'impose comme invariant fondamental, par-delà les domaines de la physique.

1843 Joule, *Sur l'équivalent mécanique de la chaleur*

1820 | 1830 | 1840 | 1850 | 1860 | 1870

1822 Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*

1824 Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines*

1831 Première dynamo électrique par Faraday

1840 Liebig, *Chimie agricole*

1856 Invention du premier colorant artificiel

1869 Tableau périodique des éléments par Mendeleïev

1847

Un obstétricien hongrois se lave les mains

Ignác Fülöp Semmelweis
1818-1865

À l'hôpital de Vienne, Ignác Fülöp Semmelweis comprend que les fièvres dont meurent les jeunes accouchées leur sont transmises par les médecins. Il préconise à ces derniers de se laver soigneusement les mains et ouvre ainsi la voie à l'antisepsie.

Un « horrible ravage »

Au XIXe siècle, les maternités publiques font figure de mouroir. Et l'hôpital de Vienne n'échappe pas à la règle. Mais tandis que la première de ses maternités atteint, dans les années 1840, un taux de mortalité par fièvre puerpérale de 25 %, la seconde affiche un taux de seulement 3 %.

Quel facteur fait la différence entre les deux services ? Les médecins l'ignorent. Ignác Fülöp Semmelweis, recruté en 1846 comme assistant d'obstétrique à l'hôpital de Vienne, est touché par le drame de ces femmes. Il décide d'enquêter.

Autopsie d'un drame

Aucune caractéristique ne distingue les jeunes femmes, admises dans l'un ou l'autre des services. Semmelweis écarte également les causes saisonnières, la surpopulation des services et la nourriture. Cependant, il remarque que seul le premier service emploie des médecins et des étudiants en médecine.

En 1847, son ami Jacob Kolletschka, blessé par un scalpel lors d'une dissection de cadavre, meurt d'une infection semblable à une fièvre puerpérale. Ce triste événement lui suggère une hypothèse : les « particules de cadavres » seraient la cause des infections, et les médecins, passant de la salle d'autopsie à la maternité, leur vecteur. Semmelweis impose alors à ses étudiants de se laver les mains à l'hypochlorite de sodium. Le taux de mortalité des jeunes accouchées chute aussitôt.

Une hiérarchie réticente

Si Semmelweis est soutenu par quelques jeunes médecins, il se heurte au conservatisme des dirigeants de l'École de médecine de Vienne. Les médecins rechignent à passer du temps à se laver les mains et ne sont pas prêts à reconnaître leurs responsabilités.

Le raisonnement de Semmelweis ne se base alors que sur les statistiques. Il lui manque, pour convaincre, la preuve de l'existence du streptocoque que les mains des médecins amènent jusqu'aux ventres des femmes. C'est la théorie microbienne de Pasteur qui expliquera cela, deux décennies plus tard.

« Médecins, lavez-vous les mains ! »

Au XVIIIe siècle déjà, plusieurs médecins comprennent que des « miasmes » sont transportés par les médecins. Ils préconisent de se laver les mains et de changer de vêtements. Ainsi, en 1802, William Buchan rédige *La Médecine domestique*, très lue mais n'atteignant pas la médecine officielle. En 1843, Oliver Holmes rédige un article sur la fièvre puerpérale et termine par « Médecins, lavez-vous les mains ! ». Toutefois, il faut attendre les travaux de Pasteur pour que la pratique des gestes d'hygiène se répande.

Robert Thom, Semmelweis, défenseur de la maternité, 1952.

« Quand on fera l'histoire des erreurs humaines, [...] on restera étonné que des hommes aussi compétents, aussi spécialisés, puissent, dans leur propre science, demeurer aussi aveugles, aussi stupides. »

Ferdinand von Hebra, cité par Louis-Ferdinand Céline dans sa thèse de médecine, *La Vie et l'œuvre de Philippe Ignace Semmelweis*, 1924.

La preuve pastorienne

Louis Pasteur (1822-1895) étudie, entre autres sujets, la fermentation et réfute l'hypothèse de la génération spontanée des microbes (► 1859, p. 228). Ces travaux apportent de nouveaux arguments à la théorie microbienne des maladies, soutenue par divers auteurs au XIXe siècle. Ainsi, le chirurgien Joseph Lister (1827-1912), se référant aux travaux de Pasteur, publie sa méthode contre la transmission des germes dans l'air en 1867, et Robert Koch (1843-1910) arrive à mettre en culture le bacille du charbon en 1876. Pasteur complète, en 1878, les préceptes de Lister en précisant que les germes sont également apportés par contact. Ainsi, peu à peu, se précisent les causes de transmission des infections et les stratégies pour les éviter : l'antisepsie et l'asepsie.

1847 Mesures d'antisepsie de Semmelweis

1820 1830 1840 1850 1860 1870

Lyell, *Principes de géologie* 1833

Humboldt, *Cosmos, essai d'une description physique du monde* 1855

1859 Darwin, *L'Origine des espèces*

Popularisation de la théorie microbienne par Pasteur 1859

1856

Un étudiant fabrique de la mauvéine

William Perkin
1838-1907

William Perkin, jeune étudiant au Royal College of Chemistry, découvre le premier colorant chimique. Il crée alors sa propre entreprise dans la région de Londres afin de produire et de commercialiser la toute première teinture artificielle, de couleur mauve.

Recycler les déchets

En 1853, William Perkin intègre le Royal College of Chemistry à Londres. Il a alors quinze ans. August Wilhelm von Hofmann (1818-1892), un chimiste réputé qui dirige l'école, demande à ses étudiants de trouver des usages au goudron de houille, un goudron issu de la transformation du charbon en coke ou en gaz d'éclairage. L'un d'entre eux parvient à en extraire du benzène et du toluène, des solvants. À Perkin, Hofmann donne la tâche de transformer le goudron en quinine, un médicament jusqu'alors extrait de plantes et utilisé contre la malaria.

Une découverte accidentelle

William Perkin ne parvient pas à fabriquer de la quinine synthétique. Mais, en 1856, il découvre par hasard qu'une substance qu'il a dérivée du goudron devient mauve après un nettoyage à l'alcool. Il expérimente et observe que cette substance teint le coton et la soie. C'est une découverte importante. En effet, jusqu'ici, toutes les teintures sont naturelles, souvent difficiles et coûteuses à produire. Le pourpre est par exemple extrait de coquillages extrêmement rares. La nouvelle substance de Perkin, bientôt appelée « mauvéine », est le premier colorant chimique.

La mauvéine s'industrialise

Comprenant que la mauvéine a un vrai potentiel industriel, Perkin entreprend de la faire breveter et de la commercialiser. À cette fin, il s'associe à son père et à son frère pour créer une entreprise. En 1857, Perkin développe les procédés de fabrication de la mauvéine et construit une usine dans la région de Londres afin de la produire en grande quantité.

Il initie ainsi une course aux teintures artificielles dans laquelle son ancien professeur, Hofmann, et d'autres chimistes allemands vont s'illustrer pendant les décennies suivantes. Au mauve s'ajoutent bientôt des rouges, des jaunes, des bleus, des violets et des bruns qui révolutionnent le monde du textile et de la mode.

La vie en mauve

La mauvéine de William Perkin trouve rapidement un marché, notamment dans le secteur de la mode féminine. En 1858, la reine Victoria apparaît au mariage de sa fille vêtue de mauve. À la même époque, l'impératrice Eugénie, épouse de Napoléon III, fait du mauve sa couleur de prédilection. Cette mode, qualifiée de *mauve mania*, durera jusqu'à la fin des années 1870.

John Phillip, *Le Mariage de Victoria, princesse royale*, 1860.

L'industrie chimique en Allemagne

Pendant les années 1860, des chimistes allemands installés en Grande-Bretagne retournent en Allemagne pour créer ou diriger de nouvelles sociétés spécialisées dans les teintures artificielles : Bayer, Hoechst, AGFA, BASF et Casella. Ils innovent en établissant des laboratoires de recherche dans leurs entreprises. C'est la première fois, en effet, que des sociétés intègrent la recherche scientifique dans leurs activités. Ces laboratoires, où travaillent plusieurs milliers de chimistes, font merveille. En 1913, les entreprises allemandes contrôlent 88 % du marché mondial des teintures synthétiques.

Premier colorant artificiel **1856**

1820 — 1830 — 1840 — 1850 — 1860 — 1870

1822 Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*

1824 Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines*

1831 Première dynamo électrique par Faraday

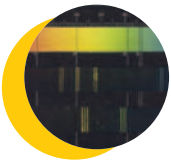
1840 Liebig, *Chimie agricole*

1843 Joule, *Sur l'équivalent mécanique de la chaleur*

1869 Tableau périodique des éléments par Mendeleïev

1859

Bunsen et Kirchhoff décodent les messages de la lumière



En Allemagne, un physicien et un chimiste développent une méthode expérimentale qui va leur permettre de découvrir de nouveaux éléments chimiques et de mieux comprendre la structure du Soleil.

Des histoires de spectres

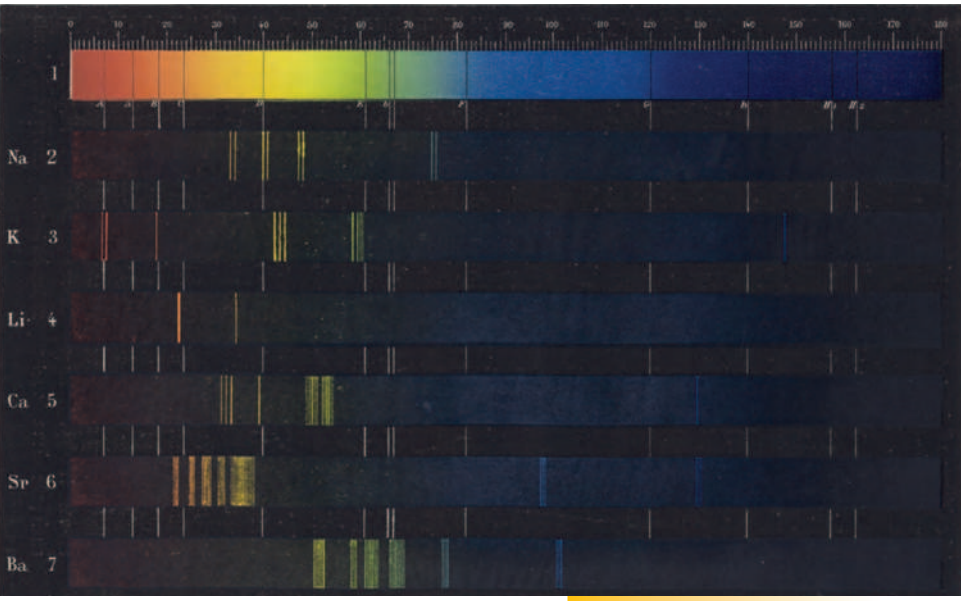
On sait depuis Newton (▸ 1687) que la lumière blanche, lorsqu'elle traverse un prisme, se décompose en un spectre multicolore. Les savants du XIXe siècle, tels que William Hyde Wollaston (1766-1828) et Joseph von Fraunhofer (1787-1826), montrent que le spectre de la lumière solaire est en réalité strié de fines raies noires. D'autres, comme Léon Foucault (1819-1868) ou Anders Ångström (1814-1874), remarquent que la lumière émise par les gaz incandescents, observée à travers des prismes, est composée au contraire d'une série de raies brillantes. Mais, la relation entre ces spectres dits aujourd'hui d'absorption et d'émission n'est pas très claire.

Une rencontre lumineuse

En 1859, le professeur de physique allemand Gustav Kirchhoff (1824-1887) se lie d'amitié avec Robert Bunsen (1811-1899), un chimiste qui vient de développer le brûleur à gaz, appelé depuis « bec Bunsen ». Il lui propose de mettre au point un nouvel instrument, le « spectroscope », pour analyser la lumière émise par des sels métalliques que l'on saupoudre dans la flamme du brûleur et en connaître la composition chimique. La méthode fonctionne et, un jour, ils observent une raie bleue qui leur révèle l'existence d'un élément inconnu : le césium (du latin *caesius*, « bleu »). Grâce à cette découverte, leur méthode s'impose dans tous les laboratoires.

Les messages de la lumière

Pour rendre compte de leurs travaux, Kirchhoff énonce les trois lois de la spectroscopie. Lorsqu'on les chauffe, les gaz à haute pression, les solides et les liquides émettent des spectres « continus », composés de toutes les couleurs. Les gaz à basse pression, chauffés, émettent, pour leur part, des spectres « discontinus » qui ne contiennent que certaines raies brillantes caractéristiques du gaz. Enfin, lorsque ces mêmes gaz, à basse température, sont traversés par de la lumière blanche, ils en absorbent une partie et leurs spectres sont alors striés de raies noires. Ces phénomènes seront expliqués par la mécanique quantique (▸ 1900).



Spectre d'absorption, spectre d'émission

Le spectre solaire (en haut) est continu, sauf pour quelques raies noires. Les six autres spectres ne sont composés que de raies brillantes caractéristiques des différents métaux (de haut en bas : sodium, potassium, lithium, calcium, strontium et baryum) saupoudrés dans la flamme du bec Bunsen. La concordance des raies dans le spectre solaire indique la présence de ces éléments dans l'atmosphère du Soleil.

Planche de spectres d'éléments métalliques extraite du *Monde physique* d'Amédée Guillemin, 1882.

« La découverte scientifique la plus remarquable de l'année [...] est sans contredit [...] la méthode nouvelle inaugurée par MM. Kirchhoff et Bunsen [qui] est une des plus étonnantes applications à la chimie des procédés de la physique. »

Louis Figuier, *Année scientifique et industrielle*, 1862.

Le mystère des taches solaires

À peine a-t-il tourné sa lunette vers le ciel que Galilée observe les taches solaires (► 1610). Dès lors, les astronomes les étudient dans l'espoir de mieux comprendre la constitution physique du Soleil : s'agit-il de nuages ou de cavités ? Pour William Herschel (1738-1822), les taches laissent entrevoir, au travers d'une enveloppe externe lumineuse, la surface sombre et solide du Soleil. Armé de sa théorie des spectres, Kirchhoff estime au contraire que le Soleil est une boule incandescente dont la matière en mouvement produit ce qui nous apparaît comme des taches. Cette boule est entourée d'une atmosphère gazeuse constituée des mêmes éléments chimiques que ceux qu'on trouve sur Terre et qui produisent ces raies sombres restées longtemps mystérieuses.

Mise au point du spectroscope **1859**

1820 | **1830** | **1840** | **1850** | **1860** | **1870**

1821 Germain, ***Recherches sur la théorie des surfaces élastiques***

1830 Comte, ***Cours de philosophie positive***

1835 Quetelet, ***Essai de physique sociale***

1843 Premier programme informatique par Lovelace

1851 Pendule de Foucault

1860 Découverte du césium par Bunsen et Kirchhoff

1859

Pasteur met fin à la génération spontanée

Louis Pasteur
1822-1895

Louis Pasteur, chimiste français, réfute définitivement la théorie de la génération spontanée et démontre que des germes microscopiques sont à l'origine de formes de vie en apparence surgies du néant.

Une génération spontanée tenace

Pour Aristote, pas de doute : la vie peut naître de la matière inerte, spontanément. L'Italien Francesco Redi (1626-1697) remet en cause cette idée et démontre que les asticots retrouvés sur la viande pourrissante proviennent en réalité d'œufs de mouche. Toutefois, le débat sur la « génération spontanée » perdure et repart de plus belle en 1859 lorsque les scientifiques Félix Archimède Pouchet (1800-1872) et Louis Pasteur, respectivement partisan et opposant de la « génération spontanée », s'affrontent à ce sujet. La controverse fait la une de la presse.

Le chant du cygne

Louis Pasteur va alors mener une expérience décisive. Il chauffe deux ballons en verre pour les débarrasser de toutes formes de vie et les laisse à l'air libre pendant plusieurs semaines. Alors que des germes se développent dans le premier ballon à col droit, aucun n'apparaît dans le second ballon à « col de cygne ». Et pour cause, le col recourbé, imaginé par Pasteur, empêche tout simplement l'arrivée de l'air, et donc des germes, à l'intérieur du ballon. Cette expérience prouve que tout vivant provient du vivant (*omne vivum ex vivo*) et pose les fondements de l'expérimentation en microbiologie.

> *« J'ai pris dans l'immensité de la création ma goutte d'eau [...], j'ai éloigné d'elle les germes qui flottent dans l'air, j'ai éloigné d'elle la vie, car la vie c'est le germe et le germe c'est la vie. »*
>
> Louis Pasteur, Conférence à la Sorbonne, 1864.

Une nouvelle vision des infections

La réfutation définitive de la génération spontanée influence l'interprétation des maladies infectieuses, en réalité provoquées par des micro-organismes invisibles à l'œil nu. Pasteur identifie les agents responsables de plusieurs maladies microbiennes et trouve des remèdes pour les combattre. Il met fin à la pébrine, une infection causée par une espèce de champignon qui décime les élevages de vers à soie en Europe, et met au point des vaccins (▸ 1796) contre le rouget des porcs, la rage ou le choléra des poules.

À chaque maladie, son micro-organisme

Pasteur devient célèbre grâce à l'efficacité de son vaccin contre la rage. En 1886, une souscription internationale est lancée pour créer un institut antirabique, qui deviendra l'Institut Pasteur en 1888. C'est dans cette institution phare de la recherche en médecine et en microbiologie que les disciples de Pasteur, tels Émile Duclaux (1840-1904) et Émile Roux (1853-1933), mènent leur combat contre les maladies infectieuses.

Albert Edelfelt, *Louis Pasteur* (détail), 1885.

Le premier pathogène identifié

L'allemand Robert Koch (1843-1910) est le premier à trouver une relation directe entre micro-organisme et maladie infectieuse. C'est en 1876, à travers l'étude de la maladie du charbon, une affection propre au bétail qui peut également toucher l'homme, que le savant va faire le lien. Il découvre en effet, dans le sang des animaux infectés, une bactérie qui a l'apparence d'un petit bâton et qu'il nomme *Bacillus anthracis*. En 1882, il marque un nouveau jalon dans la lutte contre les maladies infectieuses avec la découverte du germe *Mycobacterium tuberculosis* responsable de la tuberculose, désormais connu sous le nom de « bacille de Koch ».

Théorie microbienne de Pasteur **1859**

1820 — 1830 — 1840 — 1850 — 1860 — 1870

Lyell, *Principes de géologie* 1833

1847 Mesures d'antisepsie de Semmelweis

Humboldt, *Cosmos, essai d'une description physique du monde* 1855

1859 Darwin, *L'Origine des espèces*

Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* 1865

1859

La théorie de Darwin fait évoluer les idées sur la vie

Charles Darwin
1809-1882

L'Origine des espèces, rédigée par Charles Darwin, explique l'émergence de nouvelles espèces par un processus sélectif basé sur la survie des plus aptes. Cette conception demeure jusqu'à ce jour le cadre théorique des biologistes.

Trente ans de réflexions

En décembre 1831, le naturaliste anglais Charles Darwin entame un voyage de circumnavigation dans l'hémisphère austral à bord du *Beagle*. Durant cinq ans, il récolte de très nombreux échantillons de productions naturelles qu'il va ensuite étudier pendant plus de vingt ans. De retour à Londres, il fréquente des éleveurs qui pratiquent la sélection artificielle et revient sur le transformisme de Lamarck (▸ 1809). Riche de ses expériences et de ses lectures, Darwin publie, en 1859, *L'Origine des espèces*, un ouvrage révolutionnaire dans lequel il expose le mécanisme de l'évolution.

Des idées en évolution

Selon cette explication, les individus d'une espèce donnée sont plus au moins aptes à braver les défis imposés par la nature, à se procurer de la nourriture ou à se défendre contre les prédateurs. Ainsi, seuls les individus les plus adaptés à leur environnement restent en vie et peuvent se reproduire. Pour Darwin, cette sélection fait évoluer les caractéristiques des espèces de génération en génération. Lorsque les divergences sont trop grandes, une espèce ancestrale peut donner naissance à deux nouvelles espèces.

L'arbre de la vie

Aussi, d'après Darwin, toutes les espèces appartiennent au même arbre du vivant et sont reliées par des ancêtres communs. Plus l'ancêtre commun est récent, plus les espèces sont semblables. Plus il est ancien, plus les espèces présentent des divergences remarquables. La vie n'est plus expliquée comme un acte particulier de création divine.

La première édition de *L'Origine des espèces* fait sensation. Tous les ouvrages sont écoulés le jour même de la mise en vente. Mais si le public cultivé de l'époque adhère instantanément à l'évolutionnisme, l'opposition des plus traditionalistes et, surtout, de l'Église, est féroce. Il faudra attendre les apports de la génétique du début du XX^e^ siècle pour que le cadre théorique de Darwin soit conforté (▸ dossier, p.288-289).

> *« La sélection naturelle travaille insensiblement et sans bruit, partout et toutes les fois que l'occasion s'en présente. »*
>
> Charles Darwin,
> *L'Origine des espèces*, 1859.

La sélection sexuelle

En même temps que leur survie, les organismes vivants cherchent à assurer leur reproduction. Pour Darwin, la quête de partenaires constitue un deuxième impératif, une pulsion soumise à une sélection sexuelle. De nombreux traits sont ainsi sélectionnés pour réussir la conquête, de la queue du paon à la dent du narval, en passant par la danse des paradisiers ou le chant des grillons. Cette pression de sélection est à l'origine du dimorphisme sexuel entre mâles et femelles.

Oiseaux de paradis ou paradisiers, le mâle présentant ici un plumage jaune et blanc flamboyant, 1882.

Des interprétations faussées

L'idée du darwinisme séduit certains philosophes et démographes, qui s'en emparent pour conforter des doctrines sociales d'inspirations variées. Herbert Spencer (1820-1903), philosophe, fait appel au « darwinisme social » pour justifier la réussite des couches favorisées face aux difficultés des plus démunis. L'anthropologue Francis Galton (1822-1911) va plus loin. Il se montre partisan d'une sélection artificielle des humains afin de préserver un idéal biologique et intellectuel. Fondateur de l'eugénisme, l'objectif de Galton est par exemple mis à l'œuvre aux États-Unis, dans l'Allemagne nazie et dans certaines colonies européennes.

Darwin, *L'Origine des espèces* **1859**

1820 — 1830 — 1840 — 1850 — 1860 — 1870

Lyell, *Principes de géologie* 1833

1847 Mesures d'antisepsie de Semmelweis

Humboldt, *Cosmos, essai d'une description physique du monde* 1855

Popularisation de la théorie microbienne par Pasteur 1859

1865

Un prêtre dévoile les secrets de l'hérédité

Gregor Mendel
1822-1884

L'augustinien Gregor Mendel découvre les lois de l'hérédité en étudiant le croisement de différentes variétés de petits pois. Ses conclusions tombent dans l'oubli jusqu'à la fin du XIXe siècle, avant de servir de fondements à la biologie moderne.

Dans la quiétude de l'abbaye

Passionné de botanique, Gregor Mendel réalise des expériences de croisement sur des plantes dans le potager de l'ancien monastère augustinien de Brno, en République tchèque. Interpellé par la régularité avec laquelle reviennent les formes hybrides, il cherche à comprendre les mécanismes impliqués dans la transmission des caractères. Il choisit alors le petit pois comme modèle expérimental et présente une synthèse de sa recherche à la Société des sciences naturelles de Brno en 1865 : *Recherches sur des hybrides végétaux*.

> *« C'est à lui que revient incontestablement la découverte des lois essentielles de l'hérédité. Doté d'un esprit mathématicien et opérant, Mendel a su donner à ces lois une expression rigoureuse et définitive. »*
>
> René Taton, *Histoire générale des sciences*, 1961.

Le hasard ne fait pas la loi

Mendel base ses conclusions sur l'analyse mathématique des pourcentages de transmission des traits morphologiques, comme la couleur des fleurs, au cours des générations. Il réfute la théorie, alors couramment admise, de l'hérédité par mélange des caractères des parents. Pour lui, chaque caractère héréditaire est la réunion de deux facteurs, l'un provenant du père, l'autre de la mère. Un des facteurs est dominant, et donc visible, l'autre récessif et reste invisible. Le croisement d'une plante à fleurs pourpres avec une autre à fleurs blanches donne des fleurs pourpres en première génération, cette couleur étant dominante.

Une reconnaissance tardive

Publiés en allemand, les travaux de Mendel restent peu connus. Ils sont « redécouverts » dans les années 1900 par les botanistes et généticiens Hugo De Vries (1848-1935), Carl Correns (1864-1933) et Erich Tschermak (1871-1962). L'hérédité devient alors l'un des grands piliers de la biologie, au même titre que l'évolutionnisme ou la théorie cellulaire. C'est en 1905 que le biologiste William Bateson (1861-1926) propose le terme de « génétique » pour désigner l'étude de la transmission des caractères lors de la reproduction sexuée.

Une plante à forts caractères

Mendel prend soin de sélectionner des variétés pures de pois cultivé (*Pisum sativum*), porteuses de particularités aisément reconnaissables : couleur de la fleur (pourpre ou blanche), forme de la graine (ronde ou ridée), couleur de la graine (jaune ou verte), position des fleurs (axillaire ou terminale), forme des gousses (enflées ou articulées), couleur de la gousse (verte ou jaune) et taille de la plante (haute ou courte). Au total, il étudie environ 27 000 plantes, fruit des croisements réalisés pendant sept ans d'un travail dévoué.

Pois cultivé ou petit pois (*Pisum sativum*)

Vers une sélection artificielle

La sélection artificielle de caractères utiles à l'économie humaine est depuis toujours pratiquée par les agriculteurs et les éleveurs. Avec la découverte des lois de l'hérédité et, plus tard, des mécanismes moléculaires impliqués dans la transmission des caractères, la sélection s'accélère. Avec le développement des techniques de génie génétique, elle devient très rapide et très précise. Le génome des organismes est aujourd'hui volontairement modifié par transgenèse afin d'y introduire, par exemple, des gènes de résistance à certaines maladies. L'impact sur le patrimoine génétique naturel ainsi que les possibles effets nuisibles de l'expansion des organismes génétiquement modifiés (OGM) dans la nature suscitent des débats.

Mendel, Lois de l'hérédité **1865**

1820 — 1830 — 1840 — 1850 — 1860 — 1870

Lyell, *Principes de géologie* 1833

1847 Mesures d'antisepsie de Semmelweis

Humboldt, *Cosmos, essai d'une description physique du monde* 1855

1859 Darwin, *L'Origine des espèces*

Popularisation de la théorie microbienne par Pasteur 1859

1865

Un vent nouveau souffle sur la vie

Claude Bernard
1813-1878

Claude Bernard, un médecin français, réfute l'idée qu'une force vitale, insaisissable, est à l'origine de la vie. Dans son laboratoire, il explique le fonctionnement des organismes à travers des procédés d'expérimentation physico-chimiques.

La *vis vitalis* se dissipe

Depuis l'Antiquité, la vie est perçue comme un souffle mystérieux, peut-être divin, qui anime les animaux et les plantes. Cette force vitale, ou *vis vitalis* en latin, semble impénétrable. Toutefois, à partir du XIXe siècle, il devient enfin possible de l'étudier grâce aux sciences physico-chimiques.

La mesure de paramètres, comme la viscosité ou l'acidité des fluides présents dans le corps humain (sang, lymphe, bile, etc.), renseignent alors sur le fonctionnement des corps sains et sur les altérations causées par les maladies. Claude Bernard est pionnier dans ce domaine. Son *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, publiée en 1865, devient le texte fondateur d'une nouvelle façon d'aborder la vie.

Unis par les liens de la physiologie

> *« L'observation montre et l'expérience instruit [...] L'expérience n'est au fond qu'une observation provoquée. »*
>
> Claude Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, 1865.

Dans son ouvrage, Bernard définit ainsi, chez les animaux, les grandes fonctions physiologiques (digestion, respiration, circulation, excrétion, etc.) nécessaires à l'épanouissement de la vie et démontre l'unité de tous les êtres vivants. Il propose la notion de milieu intérieur, qui se distingue du milieu environnant par sa température, sa salinité et d'autres paramètres, et dont la régulation nerveuse et hormonale permet la survie et la bonne santé.

Un nouveau souffle pour la médecine

Par ailleurs, Bernard propose d'étudier les fondements de la vie et les pathologies sur des morceaux d'organes prélevés et maintenus vivants. Dans les laboratoires, les paillasses remplacent les tables de dissection et les scalpels cèdent la place à des équipements de détection de plus en plus sophistiqués.

Longtemps fondée sur la connaissance anatomique et le respect de l'intégralité des corps, la recherche médicale connaît, avec l'avènement des pratiques expérimentales prônées par Claude Bernard, un changement majeur.

Sciences de la vie et médecine

1770 | 1780 | 1790 | 1800 | 1810

Invention de la vaccination par Jenner 1796

Lamarck, *Philosophie zoologique* 1809

Cuvier, *Recherches sur les ossements fossiles des quadrupèdes* 1812

Les secrets de la digestion

Une bonne partie des recherches de Claude Bernard concernent la digestion. Il démontre le rôle du foie dans la fabrication et le stockage de sucres, une fonction métabolique jusque-là considérée comme l'exclusivité des plantes. Bernard constate également que l'absorption des nutriments se passe dans l'intestin grêle, et non dans l'estomac, et détermine l'action du suc pancréatique lors de la digestion. L'expérimentation pratiquée *in vivo* sur des chiens, des lapins ou des rats se révèle centrale dans l'élucidation de tous ces processus.

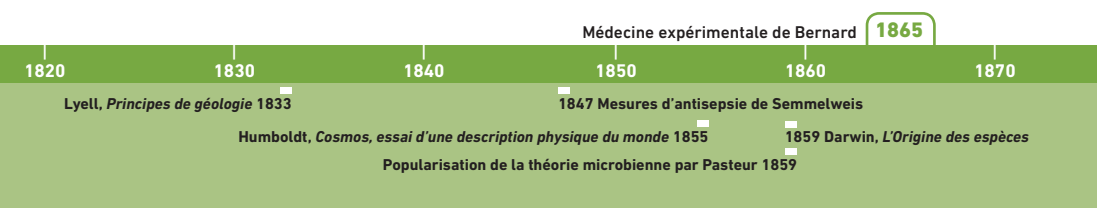
Léon Augustin Lhermitte, *Claude Bernard et ses élèves au Collège de France*, 1889.

« La méthode expérimentale n'est rien d'autre qu'un raisonnement à l'aide duquel nous soumettons méthodiquement nos idées à l'expérience des faits. »

Claude Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, 1865.

Le Jules Verne des scientifiques

Au XIXe siècle, les physiologistes s'enthousiasment du pouvoir bénéfique de la science et cherchent à aider l'être humain, placé dans des conditions extrêmes, à repousser ses limites. Paul Bert (1833-1886), disciple de Claude Bernard, s'intéresse aux effets de l'oxygène sur l'organisme et au fonctionnement du corps humain pendant la plongée sous-marine. Pour ce faire, il conçoit un scaphandre expérimental muni d'un régulateur de pression d'air. Il dirige également des expériences de respiration en haute altitude, réalisées grâce à l'envoi de ballons aérostats pilotés pouvant atteindre les sept mille mètres d'altitude.



1869

Mendeleïev met en ordre les éléments

Dimitri Mendeleïev
1834-1907

La multiplication du nombre d'éléments chimiques depuis le début du XIXe siècle stimule les efforts de classification. Celle de Dimitri Mendeleïev devient la plus répandue grâce à son succès prédictif dans la découverte de nouveaux éléments.

En quête de classement

Depuis le début du XIXe siècle, la chimie se développe comme une science quantitative, basée sur l'idée que toute matière est composée d'un nombre limité d'éléments aux propriétés chimiques spécifiques (▸ 1789).

Dans les années 1860, on connaît environ soixante éléments chimiques. Différents scientifiques tentent alors d'expliquer certaines corrélations entre le poids atomique et les propriétés chimiques à l'aide de tables ou de diagrammes.

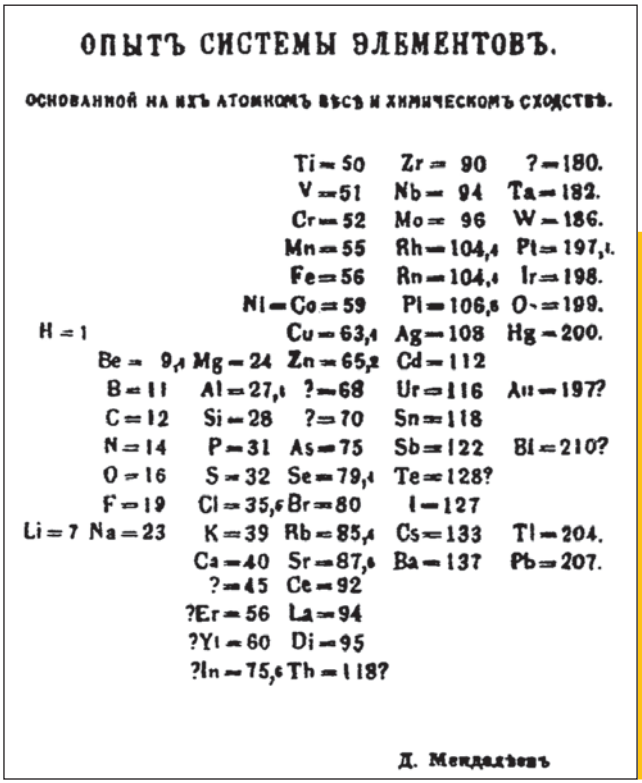
Le Britannique John Newlands (1837-1898), par exemple, organise les éléments par ordre croissant de poids atomique et observe que le huitième élément a des propriétés semblables au premier, le neuvième au second, et ainsi de suite. En faisant une analogie avec l'échelle musicale, il propose une « loi des octaves » en 1866.

Un jeu de cartes qui fait la loi

Plongé dans la rédaction d'un manuel de chimie, Dimitri Mendeleïev, professeur de chimie à l'université de Saint-Pétersbourg, est lui aussi à la recherche d'un classement des éléments. Il produit une fiche pour chacun d'entre eux, qui inclut son poids et ses principales propriétés. En arrangeant les cartes de manière que la distribution révèle les analogies, il suggère l'existence d'une loi périodique. De façon indépendante, le chimiste allemand Julius Lothar Meyer (1830-1895) arrive à des résultats similaires.

Mendeleïev présente ce premier tableau à la Société russe de chimie en 1869. Celui-ci comporte des espaces vides qui suggèrent l'existence d'éléments inconnus dont les propriétés chimiques peuvent être déduites de leur situation dans le tableau. Ignorée dans un premier temps, la table de Mendeleïev se voit confirmée par la découverte des éléments dont il a prédit l'existence : le gallium en 1875, le scandium en 1879 et le germanium en 1886.

> *« Les propriétés des corps simples, comme les formes et les propriétés des combinaisons, sont une fonction périodique de la grandeur du poids atomique. »*
>
> Dimitri Mendeleïev,
> *Principes de chimie*, 1868-1871.



ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.	
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.	
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.	
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,1.	
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.	
			Ni = Co = 59	Pl = 106,6	O = 199.	
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.	
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112		
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?	
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118		
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?	
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?		
	F = 19	Cl = 35,6	Br = 80	I = 127		
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204.	
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.	
		? = 45	Ce = 92			
		?Er = 56	La = 94			
		?Yt = 60	Di = 95			
		?In = 75,6	Th = 118?			

Д. Менделѣевъ

La nomenclature des éléments

Le premier tableau de Mendeleïev diffère des représentations modernes. Il arrange les périodes, c'est-à-dire les éléments, en ordre croissant du poids atomique, par colonnes verticales et les groupes, qui indiquent les similarités chimiques, par rangées horizontales. Les gaz nobles, découverts dans les années 1890, les lanthanides et les actinides, n'y apparaissent pas encore.

Tableau périodique de Mendeleïev publié par la Société russe de chimie, 1869.

Des éléments en ordre et en forme

Le développement de la chimie et de nouvelles techniques d'analyse permettent la découverte de nombreux éléments au cours du XIXe siècle. Alors que le *Traité élémentaire de chimie* de Lavoisier ne mentionne guère que trente-trois éléments, on en compte déjà une soixantaine vers 1850 et plus de quatre-vingts vers 1899. Les tableaux et autres modes de classification ont comme objectif de mettre de l'ordre dans cette diversité. Dès 1813, le Suédois Jacob Berzelius (1779-1848) introduit la nomenclature moderne (système de notation chimique), basée sur l'usage d'une ou deux lettres du nom latin de chaque élément et des formules algébriques pour désigner les composés. Ainsi, la nomenclature moderne de la molécule d'eau H_2O indique qu'elle est composée de deux atomes d'hydrogène (*hydrogenium*, H) et un atome d'oxygène (*oxygenium*, O).

L'avènement de l'énergie

Préoccupés par l'efficacité des machines, les savants de la révolution industrielle s'acharnent à étudier la chaleur. En combinant réflexions théoriques et expériences pratiques, ils unifient la physique sous l'empire d'un nouveau concept, celui d'énergie, et produisent des images troublantes sur le devenir de l'Univers.

Industrie, travail et économie

À l'âge industriel, la question du travail devient centrale. Le concept mécanique de travail, hérité des ingénieurs du XVIII[e] siècle comme Coulomb (▸ 1785), rencontre la notion économique de travail salarié qui préoccupe les premiers penseurs de l'industrialisation, comme Adam Smith (1723-1790) et, plus tard, Karl Marx (1818-1883). L'usage des machines est désormais jugé à l'aune de leur productivité, notamment en termes de consommation de charbon (▸ 1769, p. 174). Faisant initialement l'objet de compilation de données dans des revues telles que le *Monthly Engine Reporter*, l'efficacité des machines est ensuite abordée de manière systématique par des ingénieurs et physiciens français. Joseph Fourier (1768-1830) modélise ainsi en 1822 la transmission de la chaleur à travers une barre métallique, et Sadi Carnot (1796-1832) définit les principes théoriques utiles à l'étude des machines thermiques en supposant que la chaleur est un fluide, le calorique.

Le travail se mesure au laboratoire

C'est au Royaume-Uni et en Allemagne que la nouvelle science de la thermodynamique se consolide. Lors de ses expériences visant à améliorer le rendement des machines de sa brasserie, le physicien anglais James Joules est conduit à rejeter l'idée du calorique (▸ 1843). D'abord froidement accueillis par les savants britanniques, ses travaux obtiennent le soutien du physicien et ingénieur d'origine irlandaise William Thomson (1824-1907). Ce dernier jouera un rôle si important pour l'industrialisation britannique – notamment en appliquant la machine à vapeur à la navigation maritime et en développant la télégraphie électrique transatlantique –, qu'il sera anobli par la reine Victoria. On le connaît désormais sous le nom de lord Kelvin.

L'énergie sous toutes ses formes

En Allemagne, l'idée de l'équivalent mécanique de la chaleur est développée de manière indépendante par les physiologistes Julius Robert von Mayer (1814-1878) et Hermann von Helmholtz (1821-1894), qui postulent que le mouvement mécanique, la chaleur, la lumière, l'électricité et le magnétisme sont les différentes manifestations d'une seule et unique force. En réaction à l'idée de l'esprit vital chère à la *Naturphilosophie* (▸ 1820), ils postulent la conservation de cette « force » – nommée plus tard « énergie » – dans tout phénomène physique, y compris le métabolisme animal.

Une science de principes

Au début des années 1850, Thomson entame une réforme de la physique visant à remplacer les anciens concepts de force et d'action à distance par celui d'énergie. Deux principes émergent alors. Le premier propose que l'énergie est conservée au cours de ses transformations. Le deuxième, que l'énergie est transférée spontanément des corps chauds aux corps froids. En 1865, ce deuxième principe est précisé par Rudolf Clausius (1822-1888), qui introduit le concept d'« entropie » (mesure de la désorganisation d'un système), et combiné avec la théorie moléculaire de la chaleur de Macquorn Rankine (1820-1872). Ce dernier jette ainsi les bases théoriques de la thermodynamique moderne et de la théorie statistique de la chaleur.

Un principe aux lourdes conséquences

Née de préoccupations économiques et industrielles, la thermodynamique façonne aussi les débats sociaux, philosophiques et religieux du XIXe siècle. Elle entre en résonance avec des valeurs morales comme la lutte contre le gaspillage ou avec des idées théologiques comme l'exclusivité divine dans la création ou la destruction. D'autre part, le deuxième principe de la thermodynamique implique que le monde atteigne, à long terme, l'équilibre thermique, ce qui suppose la fin de l'Univers et l'extinction de toute vie, comme l'illustre cette gravure tirée d'un célèbre ouvrage de vulgarisation de Camille Flammarion.

Gravure de Mattaie dans Camille Flammarion, *Astronomie populaire*, 1880.

Les publics de la science

Entre 1770 et 1870, la science cesse d'être l'apanage d'un petit cercle de privilégiés. Alors que ceux qui en font leur métier se professionnalisent, souvent en embrassant une carrière d'enseignant, un public de plus en plus large se montre avide de ce type de connaissances.

Le spectacle de la science

Dès la fin du XVIII[e] siècle, les sciences s'offrent en spectacle dans toutes les grandes métropoles. Les ascensions de montgolfières donnent lieu à des rassemblements populaires inédits. Réalisé au cours de séances publiques, le traitement électrique ou magnétique des maladies offre de nouveaux espoirs. Les cabinets de lecture et les cours publics, souvent gratuits, se multiplient pour qui veut apprendre les mathématiques, l'astronomie, la chimie… Et c'est jusque dans les rues, dans les foires et les cafés que vulgarisateurs ou charlatans attirent l'attention du public vers les merveilles de la science.

La nouvelle identité du scientifique

La Révolution française transforme les institutions de la recherche et de l'enseignement supérieur (▸ 1794), au-delà même des frontières de la France (▸ 1810). Dès lors, les savants se font enseignants et le souci de la pédagogie pénètre toutes les disciplines. Alors que les premières revues spécialisées comme les *Annales de chimie* de Lavoisier (▸ 1789) se multiplient, l'Association britannique pour l'avancement des sciences organise un congrès annuel, à partir de 1831, qui réunit les *scientists* de tout l'Empire et d'ailleurs. Ce néologisme, proposé en 1833 par William Whewell (▸ 1794-1866), reflète l'émergence d'une nouvelle figure du scientifique.

L'âge d'or du journalisme scientifique

Les journaux diffusent de plus en plus les nouvelles scientifiques. Cherchant à mieux canaliser cet intérêt, François Arago, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, décide en 1835 d'accélérer la publication du compte rendu de ses séances. L'engouement du public ne se tarit pas et, dans les décennies qui suivent, plus d'une centaine de nouveaux titres sont créés par des professionnels de la vulgarisation scientifique : le *Journal des connaissances utiles*, fondé dès 1831, puis *Cosmos* de l'abbé Moigno, l'*Ami des sciences* de Victor Meunier, l'*Année scientifique* de Louis Figuier…

Les grandes messes du progrès

En 1851, une grande exposition attire à Londres plus de six millions de visiteurs dans un gigantesque palais de verre et de métal. Dès 1855, Paris accueille aussi la première d'une série d'expositions universelles toujours plus imposantes. Véritables célébrations de l'âge industriel, ces expositions ancrent dans l'imaginaire collectif un culte du progrès qui culmine avec la religion de l'humanité, de l'ordre et du progrès organisée par Auguste Comte (▸ 1830) et ses fidèles positivistes.

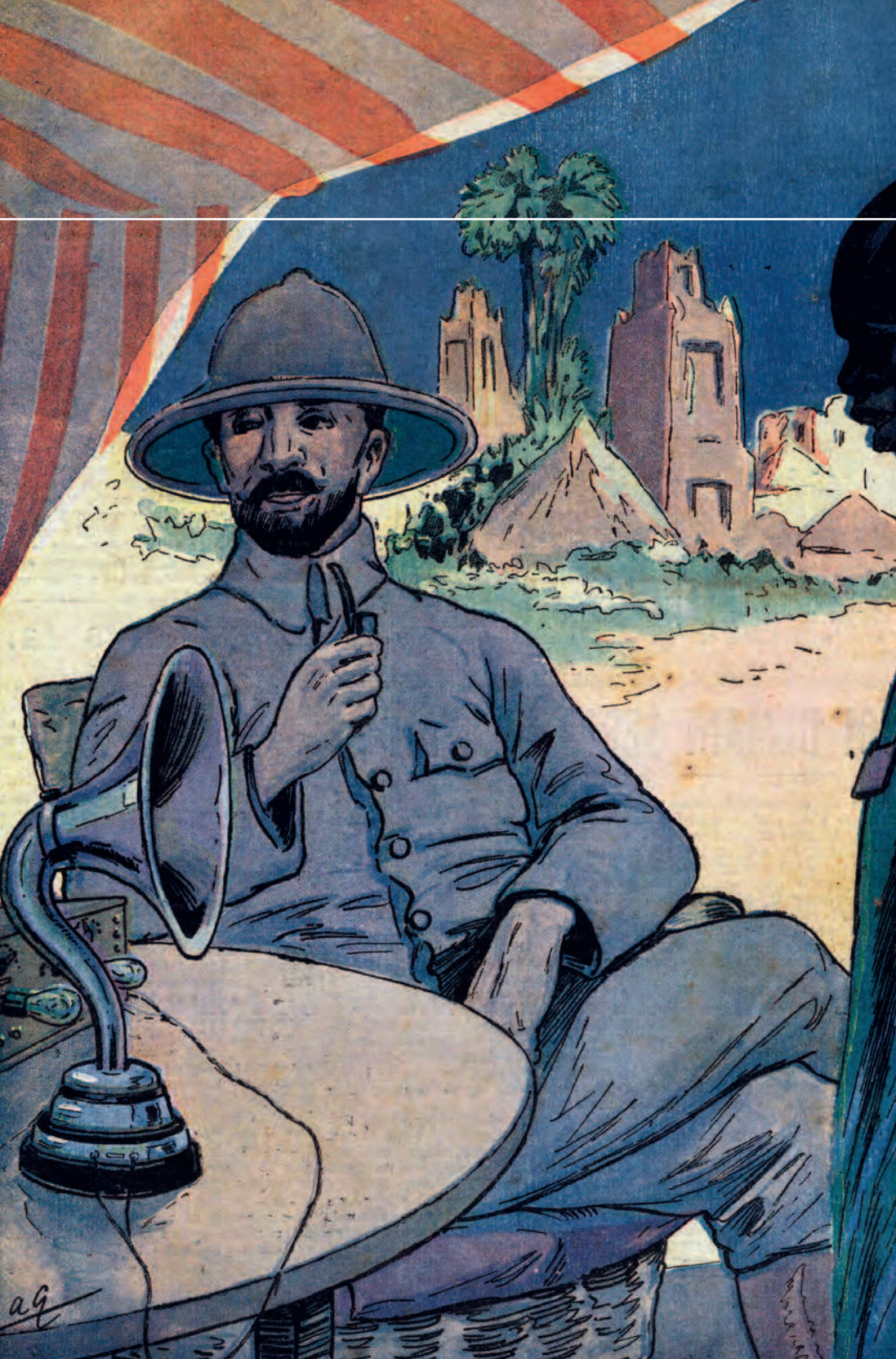
Le merveilleux scientifique

Au XIXe siècle, les merveilles de la science et de la technique se retrouvent autant sur le devant de la scène qu'en arrière-plan. Alors que le public se montre friand de spectacles qui présentent les découvertes de la science contemporaine, de nouvelles machines, comme celle qu'on peut apercevoir sur la gauche de cette gravure, produisent de fabuleux effets spéciaux qui captivent l'auditoire.

Spectacle d'astronomie au théâtre de Henri Robin, 1864.

Marx, critique de la société industrielle

Karl Marx (1818-1883) est sans aucun doute le penseur qui a produit la critique la plus incisive de la société industrielle. Chacune à sa façon, la philosophie matérialiste allemande, la pensée socialiste française et l'économie politique britannique cherchent déjà à tirer les conséquences des mutations sociales et techniques du début du XIXe siècle. S'inspirant de ces trois courants, Marx considère que l'émergence du capitalisme engendre un conflit de classe entre propriétaires et ouvriers. Dans *Le Capital*, dont le premier tome paraît en 1867, il cherche à fonder une science de l'économie basée sur la notion de travail.



L'empire des sciences

1870-1945

De multiples découvertes révolutionnent les fondements des sciences : l'atome dévoile sa structure, le temps se dilate, le vivant semble issu de la matière inorganique… Les exploits de la technique apparaissent tous les jours plus incroyables : le phonographe reproduit la voix humaine et la radio la transmet, le cinéma anime les images, l'avion s'envole et relie les continents, et, bientôt, l'automobile façonnera les territoires. Grâce à sa suprématie technoscientifique, l'Occident explore et soumet la quasi-totalité de la Terre. Deux terribles guerres mondiales font toutefois douter de l'usage qu'on fait de cette puissance.

Le Petit Journal illustré, 9 décembre 1923.

L'empire des sciences

1870-1945

La belle époque des inventions

Dans la guerre franco-prussienne de 1870-1871, l'Allemagne victorieuse s'appuie sur les techniques modernes comme le chemin de fer et les canons en acier. Dès lors, la recherche scientifique et l'innovation technique s'imposent comme des enjeux vitaux en Europe, mais aussi aux États-Unis qui viennent d'être ravagés par une terrible guerre civile (1861-1865). De nouveaux procédés de fabrication de l'acier à moindre coût permettent la construction d'édifices comme la tour Eiffel mais aussi le développement rapide de lignes de communication marines et ferroviaires.
Le télégraphe, qui relie les continents les uns aux autres, impulse le développement de l'industrie électrique (▸ 1876) puis celui de la radiophonie (▸ 1888, p. 252). On invente le cinéma et l'avion (▸ 1908). Le moteur à explosion propulse les automobiles, qui se démocratisent dès les années 1920 avec Henry Ford (1863-1947).

La maîtrise du monde

Les sciences modernes étendent leur empire. Alors que les laboratoires universitaires et industriels se généralisent, les techniques expérimentales atteignent de grandes précisions. Les découvertes techniques font apparaître de nouveaux phénomènes, comme les ondes électromagnétiques (▸ 1888, p. 252), les rayons X (▸ 1895, p. 256) et de nouveaux paradigmes, comme celui de la mécanique quantique (▸ dossier, p. 290-291). La chimie lance de nouvelles industries : celle des teintures (▸ 1856), des médicaments comme l'aspirine, des fertilisants (▸ 1909), mais aussi celle des nouveaux explosifs (TNT, dynamite) et des gaz de combat.

Avec les travaux de Louis Pasteur (1822-1895) et de Robert Koch (1843-1910), on commence à mieux comprendre et à mieux contrôler les maladies infectieuses. Dès la fin du XIXe siècle, on a exploré l'ensemble des mers du globe : les puissances occidentales se partagent l'Afrique et ont les moyens militaires et techniques d'imposer leur hégémonie globale.

Les nouveaux fondements du savoir

Entre-temps, le cœur des savoirs scientifiques est témoin de grands bouleversements. La radioactivité permet bientôt de pénétrer à l'intérieur même des atomes, jusque-là supposés insécables (► 1932). À l'échelle de l'infiniment grand, les théories relativistes d'Einstein (► 1905) bouleversent la conception de l'Univers tout entier (► 1929). Dans les sciences du vivant, les gènes deviennent le fondement de l'hérédité (► 1910). L'existence des neurones dans le cerveau est démontrée (► 1888, p. 254) et Sigmund Freud (1856-1939) explore l'inconscient. Les fondements des mathématiques mêmes sont remis en question (► 1934).

Crises de confiance

En 1914, les horreurs de la Première Guerre mondiale portent un coup sévère à la foi dans le progrès scientifique et technique. Malgré les doutes, les États en guerre créent de nouveaux organismes chargés de superviser la recherche scientifique (► 1915). Les crises économiques de l'entre-deux-guerres ne permettent pas toujours de concrétiser cette volonté. Mais bientôt, la Seconde Guerre va accumuler les innovations comme la transfusion sanguine, la production industrielle de la pénicilline (► 1928), le développement du radar, des premières fusées, des ordinateurs ou de la bombe atomique (► 1945, p. 298 et 300). Plus que jamais, les sciences montrent leur double visage, tantôt bénéfique pour l'humanité, tantôt mortifère.

1871
Étude des sciences occidentales par la mission japonaise Iwakura

1888
Détection des ondes électromagnétiques par Hertz

1895
Découverte des rayons X par Röntgen

1898
Découverte du radium et du polonium par Pierre et Marie Curie

1870 | 1880 | 1890 | 1900

1870-1871 Guerre franco-prussienne

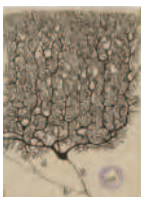
1884-1885 Partage de l'Afrique entre les puissances occidentales

1900 Grande exposition universelle à Paris

Guerre russo-japonaise 1905

1876
Lancement de la recherche industrielle par Edison

1888
Établissement de la théorie du neurone par Cajal



1895
Anticipation du réchauffement climatique

1897
Description du réflexe conditionné par Pavlov

1900
Hilbert pose les bases des mathématiques modernes

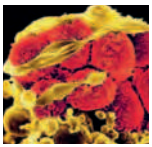
1905
Einstein, théorie de la relativité restreinte

1908
Traité mathématique sur l'aviation

1909
Procédé Haber-Bosch de synthèse de l'ammoniac

1915
Naissance des politiques nationales de recherches

1928
Découverte de la pénicilline par Fleming



1934
« Naissance » de Bourbaki

1910 — 1920 — 1930 — 1940

1914-1918 Première Guerre mondiale

1917 Révolution bolchevique en Russie

1929 Krach boursier à New York

1933 Arrivée d'Hitler au pouvoir en Allemagne

Seconde Guerre mondiale 1939-1945

1910
Morgan, théorie chromosomique de l'hérédité

1919
Confirmation de la relativité par une éclipse de Soleil

1929
Observation de l'expansion de l'Univers par Hubble

1932
Accélération de la recherche nucléaire avec le cyclotron

1944
Théorisation de l'économie

1871

Une mission japonaise étudie les sciences occidentales

Désireux de prendre en main la modernisation de son pays, le gouvernement du Japon envoie une mission aux États-Unis et en Europe afin de recueillir des renseignements scientifiques, techniques et militaires. Bientôt, l'élève japonais va concurrencer ses professeurs.

Une ouverture forcée sur le monde

En 1853, le commandant Matthew Perry, des États-Unis, contraint le gouvernement japonais à renoncer à sa politique d'isolement. Dans les années qui suivent, c'est au tour des grandes puissances européennes d'imposer, parfois sous la menace de bombardement, des traités commerciaux dits « inégaux », humiliants pour les Japonais. En réaction, l'empereur japonais reprend le pouvoir en 1868. S'ouvre alors une nouvelle ère de « gouvernement éclairé » (*Meiji* en japonais).

À bord de l'*America*

Le 23 décembre 1871, à Yokohama, plus d'une centaine de diplomates, d'officiers militaires et d'intellectuels, accompagnés de leurs familles, embarquent à bord de l'*America* à destination de San Francisco. Dirigée par l'ambassadeur Tomomi Iwakura (1825-1883), la mission se rend d'abord aux États-Unis avant d'aller vers l'Europe.

Pendant deux ans, les envoyés spéciaux visitent cours royales, champs de bataille, usines et universités. Si la mission échoue concernant la renégociation des traités inégaux, les informations collectées vont avoir une profonde influence sur le développement des sciences et de la société japonaise.

Le Japon s'industrialise

Pendant qu'elle visite l'Écosse, la mission japonaise propose à un jeune ingénieur, Henry Dyer (1848-1918), de venir à Tokyo pour y fonder une école impériale d'ingénieurs. Bientôt, les étudiants japonais de l'école vont jouer un rôle de premier plan dans l'industrialisation du pays.

L'un deux, Kunihiko Iwadare (1857-1941), part ainsi travailler pour les entreprises d'Edison aux États-Unis (► 1876) et fonde, à son retour au Japon, la société NEC (Nippon Electric Company). Après avoir produit des téléphones, la société devient l'un des plus grands fabricants d'ordinateurs. Aujourd'hui, elle reste une référence mondiale dans le secteur des semiconducteurs.

Mission Iwakura

Nous sommes en 1871. La mission Iwakura s'apprête à partir de Yokohama. La foule accompagne l'ambassadeur qui embarque sur un grand bateau à vapeur, l'*America*, symbole de la puissance occidentale que le Japon compte étudier au cours de cette mission.

D'après Yamaguchi Hôshun, *La Mission Iwakura*, 1893-1971.

Nobel nippons

Lors de la guerre de 1905, le Japon surprend toute l'Europe en battant la Russie, grâce notamment à sa maîtrise des technologies modernes. Après la Seconde Guerre mondiale, les scientifiques japonais rivalisent avec les Occidentaux. En 1949, le physicien Hideki Yukawa (1907-1981) obtient le prix Nobel pour avoir prédit l'existence d'une nouvelle particule élémentaire, le méson. Depuis, le Japon a récolté pas moins de vingt-quatre prix Nobel scientifiques et reste, au XXIe siècle, en tête du palmarès, derrière les États-Unis.

1876

Edison se lance dans la recherche industrielle

Thomas Edison
1847-1931

Thomas Edison est à l'origine d'inventions majeures comme le phonographe ou les réseaux électriques. Mais c'est aussi l'un des premiers à créer un centre de recherche et développement entièrement dédié à l'innovation. Une véritable « usine à inventions ».

Mille et un métiers

Thomas Edison entre dans le monde du travail dès l'âge de neuf ans. Il exerce toutes sortes de métiers : vendeur de journaux et de confiseries dans les trains, vendeur de légumes… puis opérateur télégraphiste. À cette époque, en 1860, la télégraphie est une technologie de pointe et Edison, en autodidacte, devient vite un expert. Il conçoit alors un appareil pouvant envoyer quatre messages simultanément sur la même ligne ! La vente du brevet sur cette invention lui permet de construire un laboratoire de recherche industrielle à Menlo Park, dans l'État du New Jersey, où il s'installe en 1876.

Le sorcier de Menlo Park

Ce laboratoire est composé d'une bibliothèque, de laboratoires de chimie et de physique et d'un atelier de mécanique. L'objectif est alors de réaliser une « petite invention » tous les dix jours et une « grande invention » tous les six mois. Parmi les centaines d'inventions qu'Edison et son équipe font à Menlo Park, de 1876 à 1881, le phonographe est sans doute celle qui a le plus grand retentissement. Cet appareil permet en effet d'enregistrer la voix humaine, une prouesse qui fascine ses contemporains. Edison est désormais connu sous le nom du « sorcier de Menlo Park ».

Les villes s'illuminent

Avec notamment l'appui financier de John Pierpont Morgan (1837-1913), un grand banquier de New York, Edison se lance dans la conception d'un système complet d'éclairage électrique, comprenant câbles, ampoules et dynamos. Ce système est installé dans les beaux quartiers de New York en 1882 et s'y développe rapidement. Mais comme toute nouvelle technologie, le réseau connaît des défaillances. Entre autres accidents, il cause un incendie dans la bibliothèque même de Morgan ! La technologie arrive néanmoins à s'imposer et, en 1888, neuf villes – parmi lesquelles Milan, Berlin et Chicago – sont équipées d'un système d'éclairage électrique suivant le modèle de New York.

Une ampoule longue durée

Thomas Edison n'est pas l'inventeur de l'ampoule électrique. D'autres modèles avaient été conçus avant le sien. Mais en 1879, Edison met au point une ampoule dotée d'une fibre de coton carbonisée, qui rallonge la durée de vie et réduit le coût de fabrication. Elle est un composant essentiel de son nouveau système d'éclairage électrique.

Le laboratoire d'Edison, à mi-chemin entre New York et Philadelphie.

Métier : inventeur

Au XIXe siècle, un inventeur n'est ni un ingénieur, ni un scientifique, même s'il peut en employer. Il appartient à une catégorie à part. C'est un professionnel de l'invention, qui identifie les principaux problèmes techniques qui se posent à l'époque et leur apporte des solutions. Il obtient des brevets sur ses inventions, qu'il revend ensuite ou qu'il exploite au sein de sa propre entreprise. Aux États-Unis, des centaines de personnes vivent de l'invention pendant la seconde moitié du XIXe siècle. Edison est le plus connu de ces inventeurs. Il est aussi celui qui obtient le plus grand nombre de brevets avec plus de mille titres !

« Le génie est fait d'un pour cent d'inspiration et de quatre-vingt-dix-neuf pour cent de transpiration. »

Thomas Edison, 1902, d'après *Harper's Monthly Magazine*, 1932.

1910 — 1920 — 1930 — 1940

1915 Mise au point du sonar par Langevin

Premier dispositif de télévision 1923

1931 Invention du microscope électronique

Première fusées V2 lancées par les Allemands 1944

Premières bombes atomiques 1945

1888

Hertz émet de bonnes ondes

Heinrich Hertz
1857-1894

Un jeune physicien allemand, guidé par une hypothèse sur l'existence d'ondes électromagnétiques, construit un dispositif capable de générer un phénomène étrange et invisible : une onde hertzienne ou radio.

De la théorie à la pratique

Dans les années 1860, James Clerk Maxwell (1831-1879) met en équation les interactions qui lient champ électrique et champ magnétique. En 1865, il prédit l'existence d'ondes associées à ces champs dits électromagnétiques, se propageant à une vitesse proche de celle de la lumière : les ondes électromagnétiques. Mais ces formules mathématiques expriment-elles une réalité physique ? Ces ondes existent-elles vraiment ? Cela reste à prouver. C'est la tâche à laquelle s'attelle le physicien Heinrich Hertz, grâce à un montage expérimental original.

Quand les étincelles font des ondes

Pour obtenir les ondes décrites, Hertz doit produire un claquage d'étincelles plusieurs dizaines de millions de fois par seconde. Pour cela, il utilise deux sphères conductrices alimentées par une bobine de Ruhmkorff. Une onde est émise ! Nous sommes en 1888. Et non seulement Hertz produit une onde électromagnétique – il s'agit de l'onde radio – mais il la détecte grâce à un résonateur en cuivre et la manipule. Comme une onde lumineuse, il la réfléchit et la réfracte, produit des interférences…

Une invention qui se propage

Les expériences de Hertz sont immédiatement reproduites dans toute l'Europe. Et si Hertz pense que ces ondes ne sont d'aucune utilité, d'autres comprennent rapidement le rôle qu'elles peuvent jouer. Entre 1890 et 1900, Édouard Branly (1844-1940) conçoit un détecteur bien plus sensible et Alexandre Popov (1859-1906) perfectionne l'antenne.

À la fin du XIXe siècle, en Italie, le physicien Guglielmo Marconi (1874-1937) réalise une transmission en morse par onde hertzienne sur plus de 2 km. La télégraphie sans fil ou TSF est née. Dès 1914 des émissions de musique sont diffusées et, à la fin de la guerre, des bandes autorisées de fréquences sont allouées aux radioamateurs. Suivront les premiers programmes radio à La Haye et à Montréal en 1919, puis les premières transmissions publiques d'images animées à Londres et à Washington en 1929.

La transmission sans fil

Les premiers signaux transmis par ondes hertziennes sont en langage morse. Ainsi, en 1901, Marconi transmet le premier message transatlantique et, en 1902, les prévisions météo sont diffusées aux navires, en morse. Concernant la transmission vocale, c'est l'inventeur canadien Reginald Fessenden (1866-1932) qui ouvre la voie : il échange une première phrase avec son collaborateur en 1900 et accompagne ses vœux de Noël de 1906 avec le Largo de Haendel, qui sera capté jusqu'à 800 km. La radio est née.

Guglielmo Marconi devant un télégraphe morse, l'émetteur et le récepteur se trouvant à droite et le manipulateur à ruban encreur, que Marconi tient dans la main, se trouvant à gauche, 1901.

Découverte ou invention ?

Les ondes hertziennes ont-elles été « découvertes » ou « inventées » ? Hertz a-t-il découvert les ondes radios, comme Becquerel a découvert la radioactivité ? En effet, les ondes électromagnétiques nous entourent à notre insu, et n'ont pas attendu le travail des physiciens pour exister. Toutefois, avant les expériences de Hertz en 1888, personne n'a la preuve que ces ondes existent, que l'objet mathématique conçu par Maxwell possède une correspondance dans le monde physique. Hertz ne découvre donc pas les ondes radios mais les invente bel et bien puisqu'il les fabrique, les manipule et les capte. D'autres physiciens après lui inventeront l'onde radio modulée pour propager nos conversations.

1910 | 1920 | 1930 | 1940

1911 Découverte de la supraconductivité par Kamerlingh-Onnes

1919 Confirmation de la relativité par une éclipse de Soleil

1927 Hypothèse d'un univers en expansion par Georges Lemaître

1935 Prédiction de l'existence du muon par Yukawa

1943 Première pile atomique à Chicago

1888

Un médecin espagnol peint des neurones

Santiago Ramón y Cajal
1852-1934

Santiago Ramón y Cajal, médecin espagnol fasciné par la coloration des tissus, doué en dessin et faisant preuve d'une grande capacité d'observation, dévoile l'organisation intime du système nerveux. Pour lui, il est constitué de cellules : les neurones.

Un monde de cellules

Dans les années 1830, les biologistes allemands Matthias Jakob Schleiden (1804-1881) et Theodor Schwann (1810-1882) concluent que les plantes et les animaux sont constitués de petites unités structurales et fonctionnelles : les cellules. Plus tard, le médecin Rudolf Virchow (1821-1902) montre que celles-ci sont aussi l'unité de développement du vivant, toute cellule provenant d'une autre cellule. Dès la seconde moitié du XIXe siècle, la théorie cellulaire est donc formulée et acceptée par l'ensemble de la communauté savante. Une seule question demeure cependant sans réponse : quelle est la véritable nature du système nerveux ?

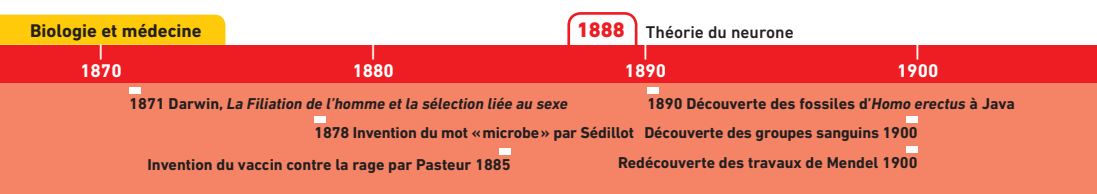
Cap sur les neurones

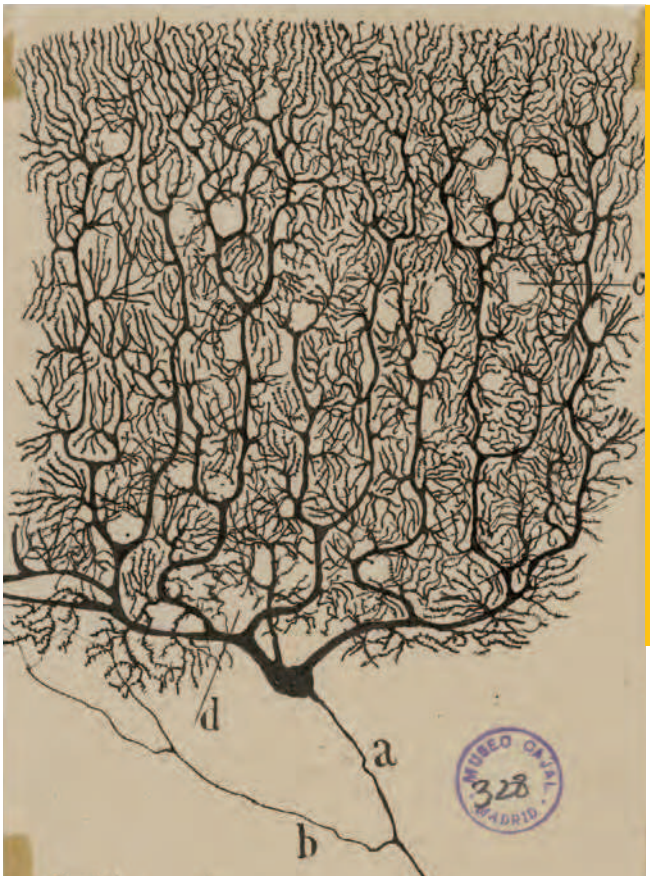
À la fin du XIXe siècle, il est couramment accepté que le système nerveux est constitué d'un réseau continu de fibres nerveuses (théorie réticulaire). Grâce à de très nombreuses observations sous microscope et à des dessins tout aussi nombreux, le médecin Santiago Ramón y Cajal montre en 1888 que les nerfs des animaux sont constitués de cellules individualisées – baptisées « neurones » en 1891 par Heinrich Wilhelm Waldeyer –, connectées entre elles par des espaces appelés « synapses ». Comme le reste des tissus, le système nerveux a donc une nature cellulaire. L'universalité de la théorie cellulaire, l'un des piliers de la biologie moderne, se confirme.

Vers une théorie cellulaire universelle

La théorie du neurone ne fait pas instantanément l'unanimité. L'italien Camillo Golgi (1843-1926), partisan de la théorie réticulaire, n'y croit pas du tout. Ironie du sort, c'est sa nouvelle méthode de coloration des tissus au nitrate d'argent qui permet à Cajal de visualiser les neurones sur ses coupes histologiques !

Les deux savants, honorés par le prix Nobel de médecine en 1906, confrontent une dernière fois leurs points de vue lors de la remise de prix à Stockholm. Cajal y expose sa théorie du neurone qui sera dès lors admise par l'ensemble de la communauté scientifique.





L'objectivité prend forme

Jusque-là, les naturalistes représentent une prétendue vérité d'après nature. L'exemple concret est négligé au bénéfice d'un archétype idéal, en réalité inexistant, censé réunir toutes les caractéristiques de l'objet d'étude (espèce, organe, tissu, etc.). À l'opposé, la démarche de Cajal, guidée par un souci d'objectivité, ne tient compte que du cas particulier. Il fait ainsi de sa propre main environ 2 900 dessins de cellules nerveuses, uniques et parfaitement fidèles à ce qu'il voit au microscope.

Dessin d'un neurone et de ses milliers de dendrites dans le cortex cérébelleux humain, Santiago Ramón y Cajal, 1899.

« Les neurones sont les mystérieux papillons de l'âme, dont les battements d'ailes pourraient peut-être clarifier un jour le secret de la vie mentale. »

Santiago Ramón y Cajal, *Souvenirs de ma vie*, 1917.

Les premières cellules sous microscope

Utilisé dès la fin du XVI^e^ siècle, le microscope permet de déchiffrer l'organisation intime des organismes vivants. Basé sur un jeu de lentilles qui augmentent la taille des objets grâce à la réfraction de la lumière, cet instrument est indispensable aux progrès de la biologie. En 1665, le savant anglais Robert Hooke (1635-1703), après avoir scruté une coupe fine de liège au microscope, propose pour la première fois le terme de « cellule » pour nommer les loges visibles sur le matériel observé. En réalité, il n'a pas repéré de véritables cellules mais leur emplacement dans un tissu déjà mort, uniquement formé des parois cellulaires inertes.

1895

Wilhelm Röntgen effectue la première radiographie

Wilhelm Conrad Röntgen
1845-1923

C'est en faisant des expériences sur les rayons cathodiques que le physicien allemand Wilhelm Röntgen découvre les rayons X et expérimente la radiographie. Quelques années plus tard, la radiologie devient une pratique courante qui révolutionne le diagnostic médical.

Le mystère des rayons cathodiques

À la fin du XIXe siècle, les physiciens essaient de comprendre la nature des rayons cathodiques. Certains pensent qu'il s'agit d'oscillations dans l'éther, un fluide qui remplirait l'univers et permettrait la propagation de l'électricité et du magnétisme. Dans leurs laboratoires, les scientifiques profitent de l'invention des générateurs de haute tension, de vide et des verres de haute résistance – des technologies associées à la mise en place des premiers réseaux de distribution d'électricité (► 1876) – pour mener leurs expériences.

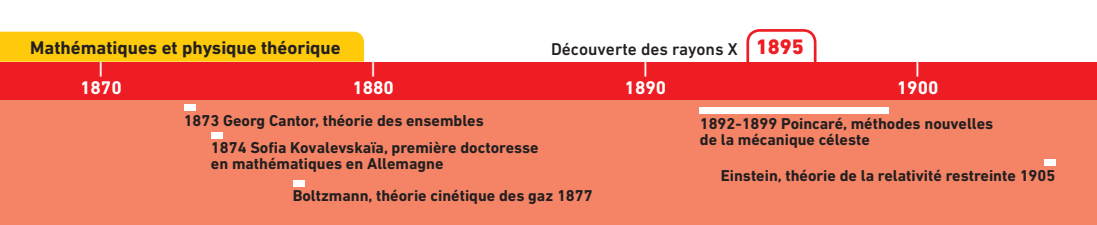
Une découverte inattendue

Le 8 novembre 1895, dans son laboratoire de l'université de Würzburg, Wilhelm Röntgen essaie de détecter ces oscillations « cathodiques » dans l'éther en combinant un écran de platinocyanure de baryum à un tube de verre, vidé de son air, dans lequel passe un courant électrique haute tension.

Dans l'obscurité, il approche sa main de l'écran devenu fluorescent et en aperçoit le squelette. Il vient de découvrir un nouveau type de radiation, capable de traverser la chair mais se trouve bloquée par les corps durs comme les os. La main de sa femme lui servira de modèle pour le premier cliché.

L'engouement pour les rayons X

Röntgen nomme le phénomène « rayons X » pour indiquer le caractère mystérieux et inattendu de sa découverte. Bien que l'origine de cette radiation reste l'objet de spéculations pendant des années, le dispositif expérimental est immédiatement reproduit dans les académies et universités d'Europe et d'Amérique, et suscite l'intérêt des médecins et des industriels. Ainsi, Röntgen recevra le tout premier prix Nobel de physique de l'histoire, établi en 1901 selon les vœux posthumes d'Alfred Nobel (1833-1896), inventeur de la dynamite, qui souhaitait récompenser les découvertes les plus remarquables et bénéfiques à l'humanité.



L'évènement de la radiographie

Les premières radiographies requièrent des temps d'exposition très longs, de plusieurs dizaines de minutes, ce qui expose les premiers radiologues à de graves brûlures et à des cancers. De grandes avancées sont réalisées dans le domaine de la radioprotection grâce aux progrès de l'instrumentation et, en premier lieu, au tube de Coolidge. Inventée en 1913, cette « ampoule » permet de contrôler avec précision l'intensité et l'énergie des rayons X émis.

Radiologie des poumons pour dépister la tuberculose, 1920.

Les usages des rayons X

Dans un de ses articles, Röntgen mentionne déjà quelques applications possibles de sa découverte : l'imagerie médicale, le contrôle de qualité industriel – qui permet aujourd'hui de détecter certains défauts dans des structures métalliques – et le contrôle de bagages. Pour la recherche scientifique, l'application la plus importante est la diffraction des rayons X, découverte en 1913 par Max von Laue (1879-1960), qui permet de déterminer la structure cristalline, la composition chimique et les propriétés des matériaux. C'est grâce à elle que l'on a pu mettre en évidence la structure en double hélice de l'ADN (► 1953).

1895

Svante Arrhenius annonce le réchauffement de la planète

Svante Arrhenius
1859-1927

Le chimiste suédois Svante Arrhenius étudie en détail l'influence du gaz carbonique sur la température au sol, et laisse présager un réchauffement global de la planète… bien avant qu'il ne soit avéré.

Le climat a une histoire

Dans les années 1830, des naturalistes suggèrent que la Terre a connu par le passé une alternance de périodes de « glaciation », avec une baisse moyenne de 5° C des températures, et de réchauffement. Comment expliquer ces variations climatiques ?

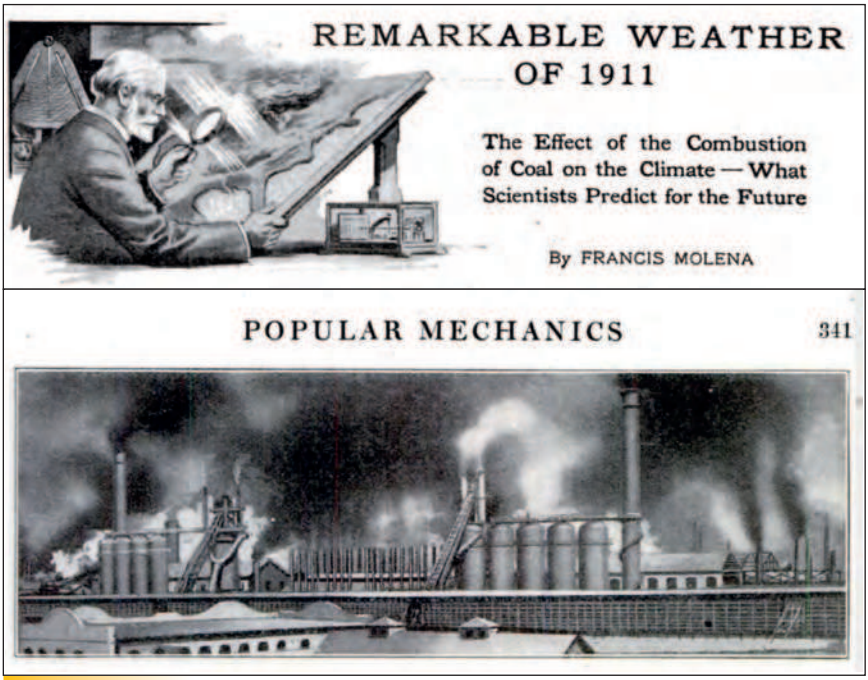
En 1859, le physicien John Tyndall (1820-1893) émet une hypothèse. D'après lui, il faut tenir compte des changements de composition de l'atmosphère, et pas uniquement des modifications de l'orbite terrestre, pour décrire ces fluctuations.

L'atmosphère et l'effet de serre

En 1895, Svante Arrhenius présente à la Société de physique de Stockholm un article intitulé « Sur l'influence de l'acide carbonique de l'air sur la température au sol ». Grâce à des données collectées *via* des stations météorologiques et à des expériences, il avance qu'un doublement de la concentration de dioxyde de carbone induit un « effet de serre » et une augmentation moyenne de la température au sol de 9 °C. Dans des travaux postérieurs, il affine son analyse. Il indique aussi que les combustibles fossiles, comme le charbon, vont conduire à un doublement de la quantité de CO_2 dans l'atmosphère et à une augmentation de la température moyenne de 4 à 5 °C d'ici l'an 5000.

Une lente prise de conscience

Au début du XX^e^ siècle, les idées d'Arrhenius ne font pas consensus car on considère que cet « effet de serre » est négligeable en comparaison des cycles glaciaires. En 1938, pourtant, l'ingénieur anglais Guy Stewart Callendar (1898-1964) avance que la hausse des gaz à effet de serre a déjà produit une « augmentation modeste, mais mesurable, de la température de la Terre ». L'humanité, avertit-il, est en train de conduire « une vaste expérience » sur le climat. Mais ce n'est qu'à partir de 1957 que l'américain Roger Revelle (1909-1991) met en place des dispositifs de mesures régulières du CO_2 atmosphérique et alerte véritablement sur la possibilité d'un réchauffement global (► 1990).



REMARKABLE WEATHER OF 1911

The Effect of the Combustion of Coal on the Climate — What Scientists Predict for the Future

By FRANCIS MOLENA

POPULAR MECHANICS 341

La presse en parle

Au début du XXe siècle, quelques journaux parlent déjà de réchauffement climatique. Certains, comme ici le magazine *Popular Mechanics*, dans un article intitulé « La météo surprenante en 1911 », s'inquiètent des quantités colossales de dioxyde de carbone rejetées dans l'atmosphère par les usines et redoutent les « effets considérables » que cela pourrait avoir dans les siècles à venir.

Extraits de l'article « Remarkable weather of 1911 » publié dans le magazine *Popular Mechanics*, 1912.

« Il est vraisemblable qu'en raison de la consommation toujours croissante de charbon [...] nous marchons vers une période plus chaude, pendant laquelle les conditions de milieu seront en général plus favorables aux êtres vivants. »

Svante Arrhenius, *Les Oscillations séculaires de la température*, 1899.

Le climat sous surveillance

Les calculs d'Arrhenius sont basés sur une formidable quantité de données enregistrées par des stations météorologiques tout autour du globe. La première collecte systématique globale est organisée en 1873, dans le cadre du premier congrès météorologique international. Une organisation météorologique internationale, créée la même année, promeut l'échange de données (températures, précipitations, insolation, etc.) et la standardisation des mesures. En 1951, dans un nouveau contexte international, elle donne naissance à l'Organisation météorologique mondiale.

1897

Pavlov fait baver les chiens

Ivan Petrovitch Pavlov
1849-1936

En étudiant les chiens de son laboratoire au moment du repas, Ivan Pavlov met en évidence le réflexe conditionné et suppose, à juste titre, qu'il est gouverné par le système nerveux central.

À table !

Ivan Petrovitch Pavlov, médecin et physiologiste russe, s'intéresse à l'influence des mécanismes nerveux sur la digestion. En 1897, il observe un comportement inattendu chez les chiens de son laboratoire. Les animaux se mettent à baver avant même que leur gamelle ne leur soit apportée ! Le chercheur décide de mettre en place une expérience pour étudier le phénomène.

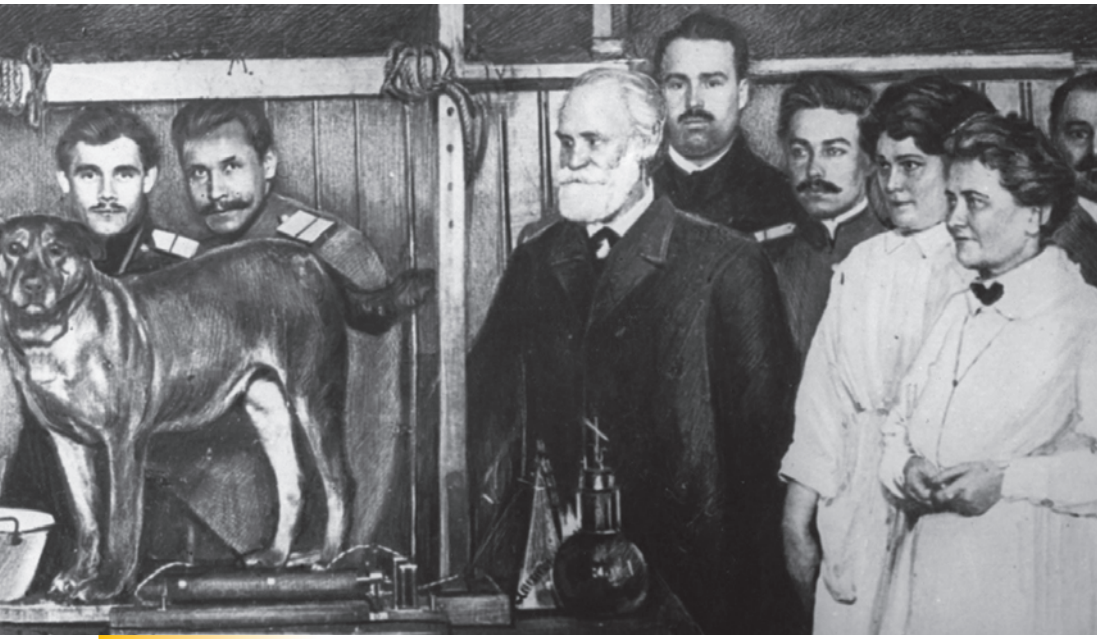
Il commence par équiper les chiens d'une petite fiole pour noter de façon précise le moment où la salive est sécrétée. Il fait alors retentir le son d'une cloche avant qu'un succulent repas de viande ne leur soit servi. On répète plusieurs fois l'expérience et on note que les animaux finissent par saliver dès le signal sonore, avant même qu'on ait apporté la viande. Pavlov parle de « réflexe conditionné ».

Le réflexe de Pavlov

En menant ces expériences, Pavlov distingue deux types de réflexe. L'aliment, par son odeur et son apparence, déclenche spontanément chez l'animal un « réflexe inconditionné » de salivation, associé à la sécrétion de suc digestif. À l'opposé, le son de la cloche déclenche un « réflexe conditionné » de salivation chez le chien qui aura associé ce stimulus à la nourriture. Ce réflexe ou conditionnement pavlovien est considéré aujourd'hui comme un aspect fondamental de l'apprentissage.

Des actions sous contrôle

Pour donner une explication au réflexe conditionné, Pavlov suppose que des connexions nerveuses temporaires se forment dans le système nerveux central sans pouvoir le démontrer. C'est l'anglais Charles Scott Sherrington (1857-1952) qui met en évidence en 1906 l'existence de l'influx nerveux, c'est-à-dire d'une activité électrique dans le neurone (► 1888, p. 254), après une stimulation sensorielle externe. Les organismes ne sont donc pas de simples assemblages de molécules, comme le défendent alors les partisans du réductionnisme, mais des systèmes complexes qui intègrent les paramètres de leur environnement grâce à l'existence d'un système nerveux central.



Expérimentation animale sous surveillance

Depuis l'émergence de la physiologie au XIXe siècle, la vivisection est pratique courante dans les laboratoires. Soucieux du bien-être animal, le Conseil de l'Europe propose en 1986 une convention visant à réduire les expériences et le nombre de vertébrés utilisés à des fins expérimentales. Aucune réglementation ne voit le jour pour les invertébrés, hormis pour les céphalopodes (pieuvre, seiche, etc.) considérés comme des animaux intelligents.

Ivan Pavlov (au centre) avec ses assistants et ses étudiants à l'Académie militaire impériale de médecine de Saint-Pétersbourg, 1912-1914.

Du chien à l'homme

Les travaux de Pavlov sur les réflexes conditionné et inconditionné influencent fortement la psychologie humaine pendant la deuxième moitié du XXe siècle. À travers l'analyse du comportement observable, les psychologues comportementalistes s'intéressent dès lors aux interactions historiquement construites entre les humains et leur environnement sans faire appel au psychisme. La raison et l'émotion sont écartées au moment d'étudier l'influence de l'environnement physique, biologique et social sur l'individu. Les thérapies comportementales permettent ainsi le traitement de troubles comme l'anxiété, l'addiction ou les psychoses.

« Le fait que tous les phénomènes de la vie humaine soient conditionnés par la recherche du pain quotidien n'est pas fortuit. C'est le lien le plus ancien qui unit tous les êtres vivants — homme compris — à la nature. »

Ivan Pavlov, *Discours de réception du prix Nobel*, 1904.

1910 1920 1930 1940

1910 Morgan, théorie chromosomique de l'hérédité

1918 Grande pandémie de grippe « espagnole »

1928 Découverte de la pénicilline par Flemming

1937 Theodosius Dobzhansky, *Genetics and the Origin of Species*

Description du syndrome de l'autisme par Hans Asperger 1943

1898

Pierre et Marie Curie découvrent des éléments radioactifs

Marie Curie
1867-1934

En étudiant les radiations de minéraux d'uranium, Pierre et Marie Curie découvrent deux nouveaux éléments radioactifs : le radium et le polonium. Leurs travaux ouvrent un nouveau champ de recherche et suscitent de grands espoirs en médecine et dans l'industrie.

La découverte des « rayons uraniques »

En 1896, dans son laboratoire du Jardin des Plantes à Paris, le professeur Henri Becquerel (1852-1908), issu d'une dynastie de scientifiques, mesure la phosphorescence de sels d'uranium – qu'il croit en rapport avec les rayons X (► 1895) – en les disposant sur des plaques photographiques et en les exposant à la lumière.

Un jour nuageux de février, Becquerel décide de reporter l'expérience et enferme ses échantillons de sels et ses plaques photographiques dans un tiroir. Quelques jours plus tard, il constate avec surprise que les plaques ont été fortement impressionnées, dans le noir, en l'absence de soleil. Il en conclut que ce sont les sels eux-mêmes qui émettent spontanément un rayonnement qu'il baptise « rayons uraniques ».

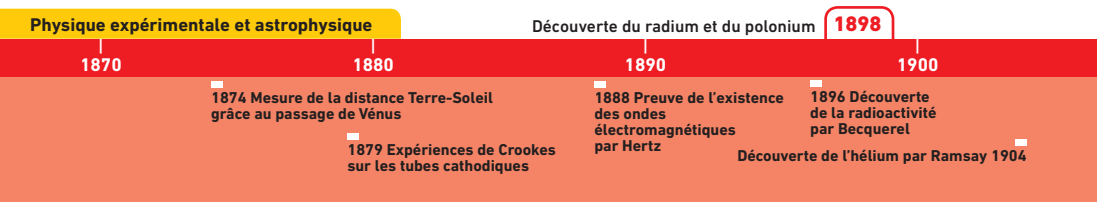
Un tandem brillant

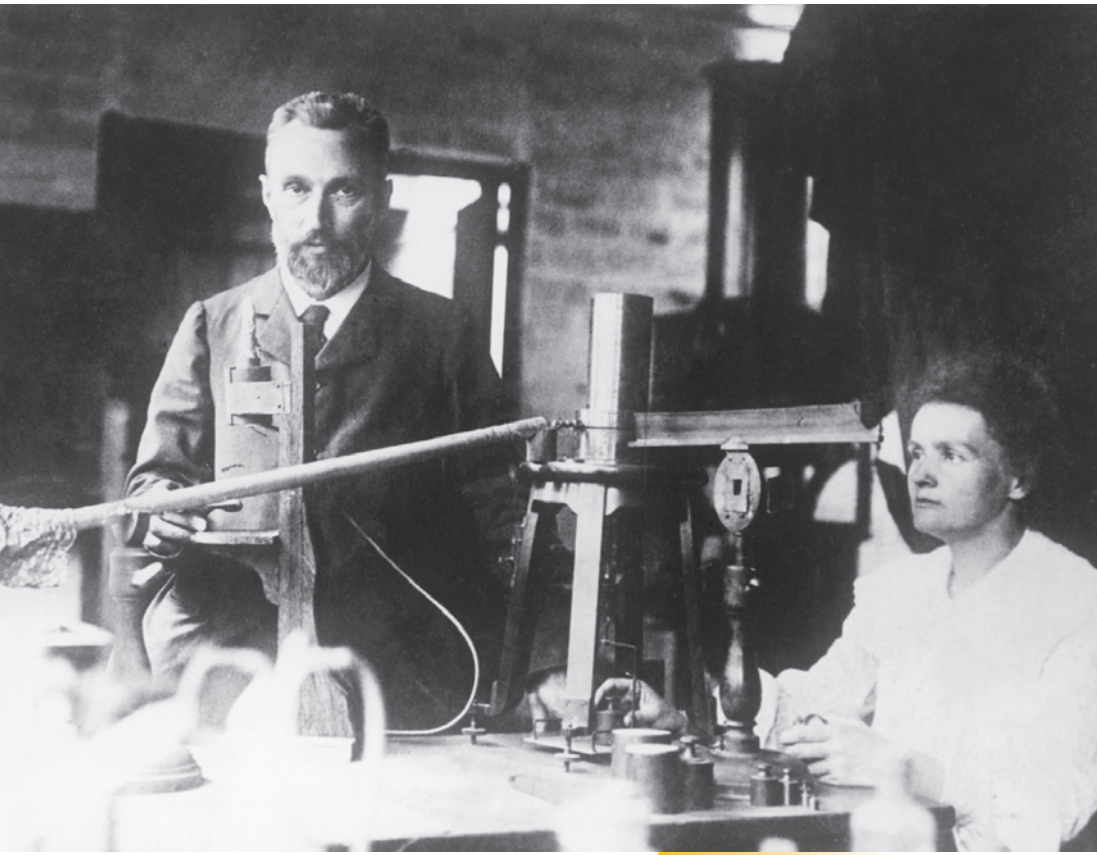
À l'École de physique et de chimie industrielles de Paris, le couple Pierre et Marie Curie reprend les travaux de Becquerel. Marie Curie étudie alors la radiation de la pechblende, un minerai d'uranium particulièrement actif, à l'aide du quartz piézoélectrique inventé par Pierre Curie pour mesurer de faibles courants électriques.

En 1898, la chimiste découvre que la pechblende contient deux nouveaux éléments chimiques : le polonium, qu'elle nomme ainsi en l'honneur de son pays d'origine, et le radium. C'est ainsi l'émission des rayons uraniques – qu'elle nommera radioactivité et dont la découverte vaudra au couple Curie et à Becquerel le prix Nobel de physique de 1903 –, qui permet de révéler ces éléments.

L'engouement pour le radium

La découverte de nouveaux éléments radioactifs suscite un grand intérêt médical et industriel. Pendant leurs recherches, Pierre et Marie Curie obtiennent ainsi le soutien de l'industriel Armet de Lisle (1853-1928), qui produit dans ses usines les premiers échantillons de radium à usage médical. L'émergence d'une industrie du radium trouve à cet élément de multiples usages, du traitement du cancer à la production de peintures lumineuses.





Une professeure à la Sorbonne

Marie Curie est aussi une pionnière dans la reconnaissance des femmes dans la science. En effet, les universités n'admettent les femmes qu'à partir des années 1860. À la Sorbonne, la première étudiante est admise à la Faculté de sciences en 1867. Et si le premier doctorat obtenu par une femme date de 1870, le professorat continue à être exclusivement masculin jusqu'à ce que Marie Curie devienne, en 1906, la première professeure de physique générale en remplacement de son mari Pierre, décédé d'un accident de la circulation. Par contre, elle ne sera jamais admise à l'Académie des sciences.

Une chimie bouleversée

La radioactivité défie les conceptions scientifiques de l'époque. Ernest Rutherford (1871-1937) et Frederick Soddy (1877-1956) suggèrent qu'elle provient de l'émission de particules et d'énergie lors de la transformation d'un élément lourd en un élément plus léger. Initialement rejetée par certains chimistes, cette idée s'imposera toutefois grâce à l'accumulation d'expériences et de découvertes, et ouvrira la porte à une compréhension rénovée du monde subatomique.

Pierre et Marie Curie dans leur laboratoire, 1905.

1910 | 1920 | 1930 | 1940

1911 Découverte de la supraconductivité par Kamerlingh-Onnes

1919 Confirmation de la relativité par une éclipse de Soleil

1927 Hypothèse d'un univers en expansion par Georges Lemaître

1935 Prédiction de l'existence du muon par Yukawa

1943 Première pile atomique à Chicago

1900

À la Sorbonne, un mathématicien pose problèmes

David Hilbert
1862-1943

Lors du second Congrès international des mathématiciens à Paris, l'Allemand David Hilbert présente une liste de vingt-trois problèmes qui dessinent les contours de la modernité mathématique.

Petite salle pour grands problèmes

C'est le 8 août 1900, dans une toute petite salle au 4e étage de la nouvelle Sorbonne, que le mathématicien allemand David Hilbert présente dix problèmes non résolus. On reconnaît très vite l'importance de cet exposé qui, une fois complété, en présente une liste de vingt-trois.

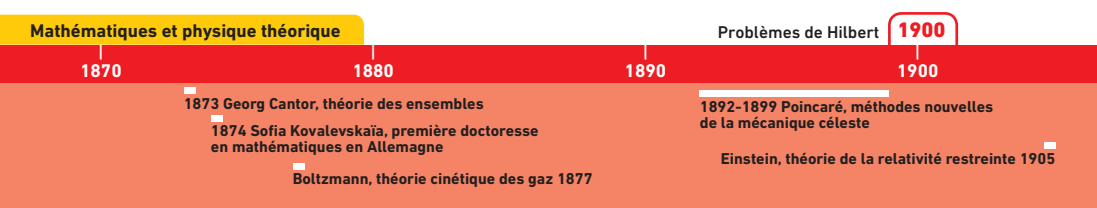
Relativement faciles à énoncer, ces problèmes permettent à Hilbert d'exprimer les directions de recherches qu'il juge les plus fertiles pour le siècle à venir. En tête de cette énumération, il place un problème de Georg Cantor (1845-1918) relatif à la théorie des ensembles et à la notion même d'infini.

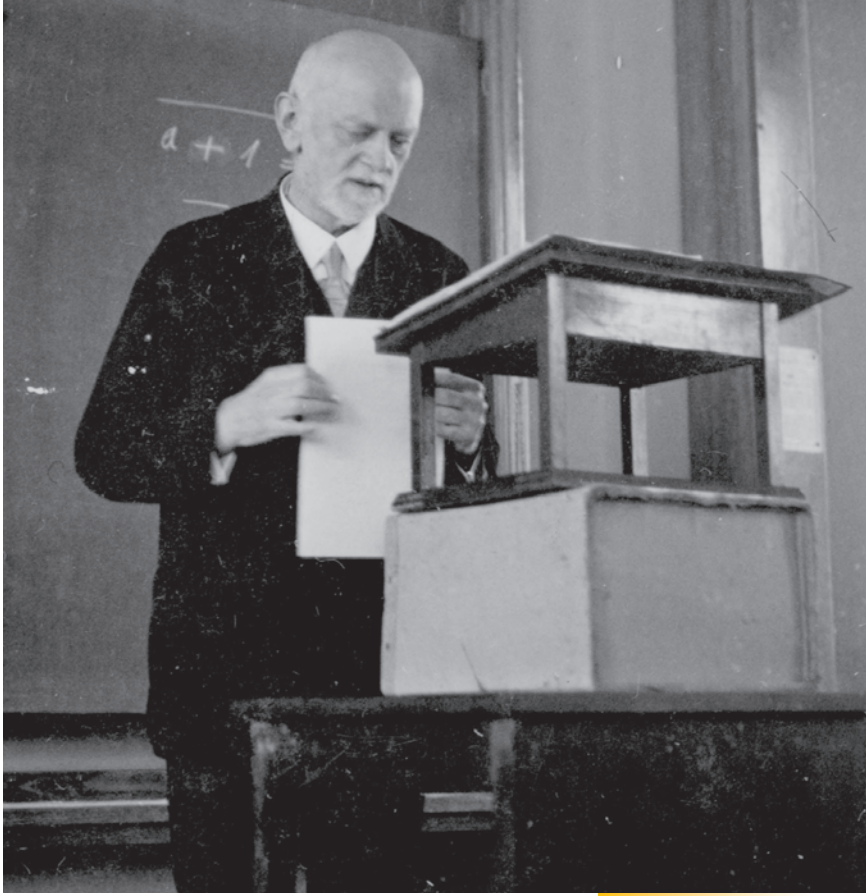
Deux visions des mathématiques

À Paris, à cette époque, ce sont deux visions des mathématiques qui s'affrontent. Dans celle de Henri Poincaré (1854-1912), les mathématiques s'ancrent dans l'expérience que l'être humain se fait du monde et aident à l'expliquer rationnellement. Le programme qu'esquisse Hilbert, avec cette liste de problèmes, est tout autre. Il cherche à définir les mathématiques comme un système formel basé sur les lois de la logique. En d'autres termes, le but des mathématiques, selon lui, se limiterait à fournir des preuves sur la base de systèmes d'axiomes choisis par convention. L'année précédente, il a démontré la faisabilité de son programme dans *Les Fondements de la géométrie* qui revisitent la géométrie d'Euclide (► – 300).

Un siècle de recherches

Les nombreux travaux de recherche inspirés par les problèmes de Hilbert pendant un siècle montrent l'incroyable fécondité de l'interaction entre mathématique et logique. Des vingt-trois problèmes énoncés en 1900, on considère que seuls trois restent à résoudre, dont la fameuse conjecture de Riemann, l'un des problèmes les plus complexes des mathématiques. S'inspirant de Hilbert, l'Institut de mathématiques Clay reprend ce problème parmi les sept défis du Prix du millénaire posés en 2000. Signe des temps : il y a maintenant un million de dollars à la clé pour qui le résoudra !





Le deuxième problème de Hilbert

Une théorie est dite non cohérente si le système d'axiomes qui la définit aboutit à une contradiction, c'est-à-dire à l'existence d'un théorème qui serait, dans la théorie elle-même, à la fois vrai et faux. Prouver la cohérence de l'arithmétique est le deuxième problème de Hilbert. Dans les années 1930, le mathématicien Kurt Gödel (1906-1978) transforme les termes du débat autour de la cohérence de l'arithmétique. Il démontre deux célèbres théorèmes d'incomplétude qui rendent les mathématiciens perplexes quant à la possibilité de trouver la preuve désirée par Hilbert. Pour beaucoup, les théorèmes de Gödel signifient que si l'arithmétique est cohérente d'un point de vue logique, elle est aussi incomplète et comporte des énoncés impossibles à démontrer !

Le siècle des congrès

Au XIXe siècle, les scientifiques des pays occidentaux commencent à éprouver le besoin de se réunir régulièrement pour discuter de l'avancement de leurs travaux. C'est lors du deuxième Congrès international de mathématiques, celui de Paris en 1900, que Hilbert expose ses vingt-trois problèmes.

David Hilbert lors du Congrès des mathématiciens, Zurich, 1932.

1910 | 1920 | 1930 | 1940

1913 Modèle de l'atome de Niels Bohr
1917 Einstein, théorie de la relativité générale
1925 Équation de Schrödinger
1934 « Naissance » de Bourbaki
1937 Machine universelle de Turing

1905

Albert Einstein vit une année extraordinaire

Albert Einstein
1879-1955

En rédigeant quatre articles devenus historiques, Albert Einstein bouleverse les fondements de la physique et introduit de nouvelles conceptions de l'espace, du temps, de la masse et de l'énergie.

De la technique à la théorie

Formé à la prestigieuse École polytechnique de Zurich, Albert Einstein travaille depuis 1902 à l'Office des brevets de Berne. Il est chargé d'examiner les brevets de dispositifs électrotechniques et, en particulier, des systèmes de synchronisation d'horloges. Ces travaux, combinés à une réflexion philosophique sur les fondements de la mécanique inspirée par la lecture du physicien et philosophe Ernst Mach (1838-1916), le conduisent à écrire quatre articles révolutionnaires.

Un, deux, trois… quatre articles

Dans le premier article, l'auteur propose une explication de l'effet photoélectrique – apparition de courants électriques dans un métal soumis à la lumière – en supposant, comme Max Planck, que la lumière se propage par petits paquets ou quanta (► dossier, p. 290-291). Dans le deuxième article, il explique le mouvement de petites particules en suspension dans un liquide et démontre l'existence des atomes. Le troisième article met en place les principes fondamentaux de la théorie de la relativité restreinte. Dans le dernier article, Einstein déduit de sa nouvelle théorie un rapport entre l'énergie d'un corps et sa masse au repos, qui suggère la plus célèbre des équations de la physique : $E = mc^2$.

Au fondement de la physique moderne

Ces articles, qui redéfinissent les notions de l'espace, du temps, de la masse et de l'énergie, sont publiés dans les *Annalen der Physik*, la plus prestigieuse des revues de physique allemande, en 1905. Bientôt, la communauté des physiciens théoriques reconnaîtra l'importance des travaux d'Einstein, aujourd'hui considérés comme étant au fondement de la physique moderne. En 1914, Einstein devient membre de l'Académie de sciences et de l'université de Berlin, et le prix Nobel de physique lui est accordé en 1921 pour l'explication de l'effet photoélectrique.

Du restreint au général

La théorie de la relativité restreinte veut réconcilier la mécanique de Newton avec les lois de l'électromagnétisme énoncées par James Clerk Maxwell (► 1888). Cette exigence conduit Einstein à se débarrasser de quelques idées chères aux physiciens avant lui, comme les concepts de temps et d'espace absolus ou l'existence de l'éther, un fluide censé remplir l'espace et servir de support matériel aux ondes électromagnétiques. En 1915, il élabore une théorie de la relativité générale qui lui permet d'expliquer l'attraction gravitationnelle comme le résultat des propriétés mathématiques de l'espace-temps (► 1919).

Horloge de la mairie de Berne, ville où Einstein a conçu sa théorie de la relativité.

Un savant engagé

Einstein est un savant engagé qui n'hésite pas à participer aux débats politiques de son temps. Après l'élection d'Adolf Hitler en 1933, il quitte l'Allemagne et se réfugie aux États-Unis. Bien qu'il recommande au président Roosevelt de poursuivre des recherches sur la fission nucléaire, il devient après la guerre un des référents de l'opposition aux armes atomiques. Ainsi, en 1955 il signe avec le philosophe Bertrand Russell (1872-1970) l'un des plus importants manifestes pour le désarmement nucléaire. Ses nombreuses prises de position contre le racisme, le militarisme et le nationalisme lui valent d'être secrètement surveillé par le FBI.

1908

Le mathématicien Painlevé fait décoller l'aviation

Paul Painlevé
1863-1933

Les avions volent bien avant que les mathématiciens ne réussissent à expliquer pourquoi. Toutefois, sans les mathématiques, l'aviation n'aurait pas pu se développer comme elle l'a fait. C'est ce qu'illustre le premier vol de Paul Painlevé dans un avion Wright.

À en perdre sa casquette

Le 10 octobre 1908, au camp d'Auvours près du Mans, l'avion des frères Orville et Wilbur Wright, le *Flyer*, s'élance devant plus de vingt milles spectateurs. Dans l'appareil, le mathématicien Paul Painlevé, représentant de l'Académie des sciences, est chargé d'authentifier le vol. Alors que l'avion prend de la vitesse, sa casquette s'envole. D'un geste brusque, il tente de la rattraper et coupe le cordon d'allumage. Furieux, Wilbur Wright s'attelle à la réparation. Au second essai, l'avion reste en l'air plus d'une heure, battant ainsi le record du monde du plus long vol mécanique.

Un rêve impossible ?

Cet exploit n'est pas le premier réalisé par les frères Wright. Dès la fin de 1903, ils réussissent à faire voler un appareil motorisé plus lourd que l'air. Par ailleurs, le français Clément Ader (1841-1925) parvient à quitter le sol avec des appareils de son invention dès 1890. Pourtant, les scientifiques n'arrivent pas encore à expliquer ce phénomène.

Dès le XVIII^e siècle, Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) conclut que les lois connues de la mécanique des fluides conduisent à un paradoxe : l'absence de résistance au mouvement dans un fluide. Impossible donc pour les oiseaux de s'appuyer sur l'air pour s'y élever. Encore en 1905, le physicien militaire Emmanuel Vallier termine une longue série de travaux théoriques en réaffirmant l'impossibilité pratique du vol des appareils plus lourds que l'air.

Naissance de l'aérodynamique

Après son premier vol, Painlevé entreprend d'écrire, avec le mathématicien Émile Borel (1871-1956), un traité grand public sur l'aviation qui paraît en 1910. Si leurs calculs n'en contredisent plus la possibilité, ils sont encore bien loin d'une théorie complète du vol aérien. Ce rapprochement des mathématiques et de l'aéronautique annonce l'essor d'une discipline d'avenir, fille de l'étude des écoulements des fluides, l'aérodynamique. Malgré sa complexité, cette discipline permet le développement de l'aviation au XX^e siècle.

Le temps de l'envol

Il fallait un certain courage pour accepter de prendre place dans un avion en 1908. Et Paul Painlevé n'en manquait visiblement pas ! Quelques jours après l'exploit des frères Wright de 1908, on le retrouve ainsi au côté de l'aviateur Henri Farman (1874-1958) à bord de son biplan *Voisin*.

Paul Painlevé (à droite) et Henri Farman, Châlons-sur-Marne, 28 octobre 1908.

« Le progrès ne peut naître que de la coopération entre la théorie et la pratique. Dans cette coopération, le rôle de la théorie se réduit à fournir des indications [...] ; c'est toujours l'expérience qui doit avoir le dernier mot ; mais le rôle de la théorie [...] n'en est pas moins essentiel, et il serait injuste de l'oublier. »

Paul Painlevé et Émile Borel, *L'Aviation*, 1910.

Turbulences en mécanique des fluides

Dès le milieu du XVIIIe siècle, le grand mathématicien Leonhard Euler (► 1745) déduit les équations qui régissent le mouvement d'un fluide idéal. Près d'un siècle plus tard, l'ingénieur Henri Navier et le physicien George Gabriel Stokes écrivent les équations qui permettent de rendre compte du comportement des fluides visqueux.

Mais la résolution exacte de ces équations s'avère impossible, sauf dans quelques cas simples. Malgré les importants travaux d'Osborne Reynolds, Ludwig Prandtl et Andreï Kolmogorov, la résolution des équations de Navier-Stokes reste un problème ouvert : c'est même l'un des sept défis posés par l'Institut de mathématique Clay en 2000 (► 1900).

1908 Traité mathématique sur l'aviation

1910 — 1920 — 1930 — 1940

1915 Mise au point du sonar par Langevin

Premier dispositif de télévision 1923

1931 Invention du microscope électronique

Première fusées V2 lancées par les Allemands 1944

Premières bombes atomiques 1945

1909

Fritz Haber invente un procédé chimique explosif

Fritz Haber
1868-1934

Le procédé Haber-Bosch, qui sert à produire des engrais azotés mais aussi des explosifs, est l'une des plus importantes inventions du xx^e siècle. Elle est aussi l'œuvre d'un des personnages les plus controversés de l'histoire de la chimie.

À la recherche de nouveaux engrais

Dans les années 1830, les chimistes Jean-Baptiste Boussingault (1802-1887) et Justus von Liebig (1803-1873) établissent le rôle central de l'azote dans la croissance des plantes. Du jour au lendemain, les sources naturelles d'azote – comme le guano du Pérou ou le salpêtre du Chili – deviennent des engrais très convoités pour l'agriculture, des ressources stratégiques qui seront parfois à l'origine de guerres en Amérique du Sud.

Mais ces ressources s'épuisent rapidement, et la production artificielle d'azote devient un enjeu clé pour l'industrie chimique. En 1909, Fritz Haber arrive pour la première fois, de façon économique, à fixer l'azote atmosphérique sous forme d'ammoniac en utilisant comme catalyseur de l'osmium ou de l'uranium à basse température.

Un procédé très prisé par l'industrie

Haber vend les droits de son invention au groupe industriel de chimie BASF. Sous la supervision de l'industriel Carl Bosch (1874-1940), le procédé « Haber-Bosch » est adapté à l'échelle industrielle pour produire de l'ammoniac, une substance à multiples usages. Ainsi, pendant la Première Guerre mondiale, il est utilisé pour la production d'explosifs.

Une fois les hostilités terminées, le procédé chimique se répand et il est mis au service de l'agriculture industrielle, en association avec de nouvelles variétés végétales et des pesticides. La hausse de la productivité agricole due aux engrais azotés est notable et constitue l'une des bases matérielles qui ont contribué à l'augmentation explosive de la population humaine depuis 1950.

> *« Quelle a été l'invention technique la plus importante du vingtième siècle ? Les réponses les plus courantes sont les avions, l'énergie nucléaire, les vols spatiaux, la télévision et les ordinateurs. Pourtant, aucune de ces inventions n'a été aussi fondamentale que la synthèse industrielle de l'ammoniac. »*
>
> Vaclav Smil, *Enriching the Earth*, 2001.

La naissance de l'agronomie

C'est à partir du second tiers du XIXe siècle que des méthodes scientifiques sont systématiquement appliquées à l'agriculture. L'agronomie se développe rapidement, donnant lieu à la création de nouvelles institutions de recherches, les stations agronomiques. Des programmes de recherches, comme celui mené par le chimiste allemand von Liebig à l'université de Giessen, sont centraux pour le développement de la chimie et son application à l'agriculture (► 1824, p. 212).

La guerre chimique

Au début de la Première Guerre mondiale, Fritz Haber souhaite contribuer à l'effort de guerre militaire allemand. Travaillant d'abord à l'amélioration de combustibles, Haber et ses collaborateurs de l'Institut Kaiser-Wilhelm de chimie physique et d'électrochimie développent bientôt de nouvelles armes chimiques à partir du chlore. En janvier 1915, la première offensive à grande échelle a lieu à Bolimov (Pologne) et, en avril de la même année, le chlore est utilisé pour la première fois à la bataille d'Ypres. Le rôle clé joué par Haber dans la production de ces armes jette une ombre sur le prix Nobel qui lui est accordé en 1918 pour la synthèse de l'ammoniac.

1909 Procédé chimique Haber-Bosch

1910 | 1920 | 1930 | 1940

1915 Mise au point du sonar par Langevin

Premier dispositif de télévision 1923

1931 Invention du microscope électronique

Première fusées V2 lancées par les Allemands 1944

Premières bombes atomiques 1945

1910

Thomas Morgan regarde les mouches dans les yeux

Thomas Hunt Morgan
1866-1945

Une équipe de scientifiques nord-américains dirigée par Thomas Hunt Morgan identifie le siège de l'hérédité et établit la première cartographie génétique d'un être vivant, celle de la mouche du vinaigre.

La mouche se montre sans gêne

En 1900, on redécouvre les lois de Mendel sur l'hérédité (► 1864) et on commence à expérimenter la transmission héréditaire des caractères sur une grande variété de plantes et d'animaux.

Aux États-Unis, Thomas Hunt Morgan et ses collaborateurs portent leur choix sur un organisme facile à élever et dont le cycle de reproduction est d'environ dix jours : la mouche du vinaigre (*Drosophila melanogaster*). Elle deviendra bientôt le modèle expérimental par excellence de la génétique animale.

Parmi les milliers de mouches aux yeux rouges qu'il élève dans son laboratoire, Morgan repère en 1910 la présence d'un mâle aux yeux blancs dont les descendants ont une apparence normale. Il fait alors des croisements entre des individus mutants, aux yeux blancs, et des individus aux yeux rouges, et confirme, le premier, les lois de Mendel de façon expérimentale chez l'animal.

Les chromosomes portent l'hérédité

Reste alors à identifier où se trouvent physiquement les facteurs de l'hérédité. Sont-ils portés par les chromosomes ? Les disciples de Morgan, Calvin Bridges (1889-1938) et Alfred Sturtevant (1891-1970), en apportent la preuve définitive grâce à la cartographie de chromosomes géants extraits des glandes salivaires de la mouche du vinaigre. Ces structures ont la particularité de présenter une alternance de bandes d'intensité changeante qui correspondent aux différentes unités de l'hérédité, qu'on appellera plus tard des « gènes ».

Lors de ces prémices de la génétique, la collaboration entre chercheurs a été indispensable. Depuis, la recherche en biologie a fait du laboratoire son lieu de prédilection et l'image du savant éclairé s'est estompée au bénéfice de celle du spécialiste.

> *« La localisation des gènes sur les chromosomes, selon un ordre bien précis, est aujourd'hui établie. »*
>
> Thomas Hunt Morgan, lors de son discours de réception du prix Nobel, 1934.

Biologie et médecine

1870 | 1880 | 1890 | 1900

1871 Darwin, *La Filiation de l'homme et la sélection liée au sexe*
1878 Invention du mot « microbe » par Sédillot
Invention du vaccin contre la rage par Pasteur 1885
1890 Découverte des fossiles d'*Homo erectus* à Java
Découverte des groupes sanguins 1900
Redécouverte des travaux de Mendel 1900

Des organismes modèles

Dans l'Antiquité, déjà, Alcméon dissèque des chiens pour étudier la vision (► – 500) et Aristote utilise l'œuf de poule pour décrire le développement embryonnaire. Aujourd'hui, les scientifiques travaillent sur une vingtaine de modèles animaux et végétaux de référence. La souris – alors utilisée pour détecter le grisou dans les mines – mais aussi la mouche du vinaigre, le poisson zèbre, le cochon d'Inde, le tabac, le riz ou la bactérie *Escherichia coli* font partie de cette poignée de « modèles » du vivant.

Drosophile vue au microscope.

Une pionnière oubliée

L'existence des chromosomes sexuels est démontrée par une élève de Morgan, Nettie Maria Stevens (1861-1912). En 1905, la généticienne met en évidence chez le ténébrion meunier (*Tenebrio molitor*), un autre insecte modèle, que les chromosomes sont des structures bien distinctes, organisées par paires à l'intérieur des noyaux des cellules. Grâce à l'emploi du microscope optique, elle observe que l'une des paires change en fonction du sexe, qu'elle est plus petite chez les mâles (XY) que chez les femelles (XX). Elle prouve alors que le spermatozoïde, porteur d'un chromosome soit X soit Y, est responsable du sexe de la descendance.

1910 Théorie chromosomique de l'hérédité

1910 — 1920 — 1930 — 1940

1928 Découverte de la pénicilline par Flemming

1918 Grande pandémie de grippe « espagnole »

1937 Theodosius Dobzhansky, *Genetics and the Origin of Species*

Description du syndrome de l'autisme par Hans Asperger 1943

1915 L'État prend la recherche scientifique en main

La Première Guerre mondiale fait prendre conscience du caractère stratégique de la recherche scientifique et technique. Toutes les nations se dotent alors d'organismes officiels pour la financer et la piloter.

Face à l'urgence

Quand le conflit éclate en août 1914, l'état-major français imagine que la guerre sera de courte durée et, face à l'urgence de la situation, néglige complètement la recherche scientifique et technique. À Paris, l'Académie des sciences, qui se met au service de la défense nationale, n'est guère sollicitée par le gouvernement. Avec la stabilisation du front et le début de la guerre des tranchées, les choses changent : on se met alors à rêver à l'arme décisive qui offrira la victoire…

La guerre des inventions

Il faut réagir ! Le mathématicien Paul Painlevé (► 1908) est alors nommé ministre des Inventions intéressant la défense nationale, en 1915, et reçoit la mission d'organiser une véritable politique scientifique et technique. Il veut enrôler savants et ingénieurs au service de la nation. À la tête de la nouvelle Direction des inventions, son ami, le mathématicien Émile Borel (1871-1956), met en œuvre cette idée. À la fin de la guerre, la Direction a soumis 781 nouvelles inventions aux services techniques de l'Armée, parmi lesquelles de nouveaux moyens de communication, des plans de chars d'assaut, des procédés de fabrication de gaz de combat (► 1909), etc.

La science nationalisée

Comme la France, tous les pays développés adoptent alors des politiques nationales de recherches et de développement scientifiques et techniques. Cette tendance est renforcée par les autres conflits du XX^e^ siècle : la Seconde Guerre mondiale et la guerre froide. En France, en 1939, on fonde le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) en se basant sur l'héritage de la Direction des inventions. Tous les pays ont désormais conscience qu'on ne peut négliger les sciences et les techniques, importantes ressources stratégiques, qu'à ses risques et périls.

> *« C'est la première fois […] que dans un document gouvernemental on admet officiellement la science à jouer un rôle dans les affaires de l'État. »*
>
> Charles Nordmann, *Revue des Deux Mondes*, 1915.

Techniques

1870 — 1880 — 1890 — 1900

1869 Ouverture du canal de Suez

1875 Mise au point de la dynamo par Zenobe Gramme

1889 Tour Eiffel

1895 Cinéma des frères Lumière

Premiers vols d'un avion des frères Wright 1903

Médecine de guerre

La Première Guerre mondiale est sans doute le premier conflit où les armes tuent davantage que les maladies et les famines. Et pour cause, la médecine et la chirurgie ont progressé. L'antisepsie, la vaccination et la transfusion sanguine se démocratisent tandis qu'apparaissent de nouvelles techniques d'imagerie. En France, la physicienne Marie Curie (▸ 1898) développe des unités mobiles de radiographie, auxquelles sa fille Irène apporte un concours déterminant.

Irène Joliot-Curie parmi les infirmières en radiologie formées à l'Institut du radium, 1917.

Dans les airs et sous les mers

Pendant la Première Guerre mondiale, les progrès techniques permettent aux zones de combat de s'étendre bien au-delà des champs de bataille traditionnels. Dans les airs, tandis que les zeppelins bombardent les populations civiles, les avions servent à identifier les cibles de l'artillerie. Dans les profondeurs de l'océan, les sous-marins traquent les navires. Pour aider la marine française à se défendre contre ces attaques, l'ingénieur d'origine russe Constantin Chilowski et le physicien français Paul Langevin (1872-1946) imaginent en 1917 un système de détection à base d'ultrasons qui, plus tard, deviendra le sonar.

1915 Politiques nationales de recherches

1910 — 1920 — 1930 — 1940

1915 Mise au point du sonar par Langevin

Premier dispositif de télévision 1923

1931 Invention du microscope électronique

Première fusées V2 lancées par les Allemands 1944

Premières bombes atomiques 1945

1919

Une éclipse de Soleil consacre la relativité d'Einstein

Arthur Eddington
1882-1944

Menées par Arthur Eddington, des observations de l'éclipse de Soleil du 29 mai 1919 confirment la théorie de la relativité générale et font d'Albert Einstein une célébrité.

Einstein généralise sa théorie

Après la publication de sa théorie « restreinte » de la relativité (► 1905), Albert Einstein se penche sur sa généralisation, qui doit inclure une explication de la nature de la gravité. Il y aboutit finalement en 1915 en utilisant l'analyse tensorielle, un outil mathématique développé à la fin du XIXe siècle.

Mais la nouveauté de ce formalisme en physique, l'attachement des scientifiques britanniques et français pour les théories de l'éther ainsi que le contexte de guerre mondiale limitent la diffusion de la relativité générale. Einstein propose pourtant différentes façons d'éprouver sa théorie : l'avancement du périhélie de Mercure, le décalage des raies d'un atome placé dans un champ de gravitation, et la déflexion de la lumière par des objets très massifs, observable lors d'une éclipse de Soleil par exemple.

Une éclipse au secours de la théorie

L'astronome britannique Arthur Eddington (1882-1944), un des plus grands partisans d'Einstein en Angleterre, est justement chargé des observations de l'éclipse prévue le 29 mai 1919. En photographiant les étoiles en arrière-plan du Soleil pendant l'éclipse totale, il espère montrer que la lumière émise par une étoile passant à proximité du Soleil est déviée conformément aux calculs de la relativité générale. Les résultats des observations de l'éclipse sur l'île africaine de Principe et dans la ville brésilienne de Sobral sont présentés en décembre 1919 lors de la réunion de la Royal Astronomical Society. Ils confirment les prédictions de la théorie de la relativité.

Le triomphe d'Einstein

Le 7 novembre 1919, le quotidien anglais *The Times* est le premier à porter Einstein aux nues en titrant l'un de ses articles : « Révolution en sciences : Une nouvelle théorie de l'Univers, les idées de Newton renversées ». Einstein profitera de cet engouement pour diffuser ses travaux postérieurs sur les implications cosmologiques de la relativité et sur une théorie unificatrice des lois de la physique.

Physique expérimentale et astrophysique

1870 — 1880 — 1890 — 1900

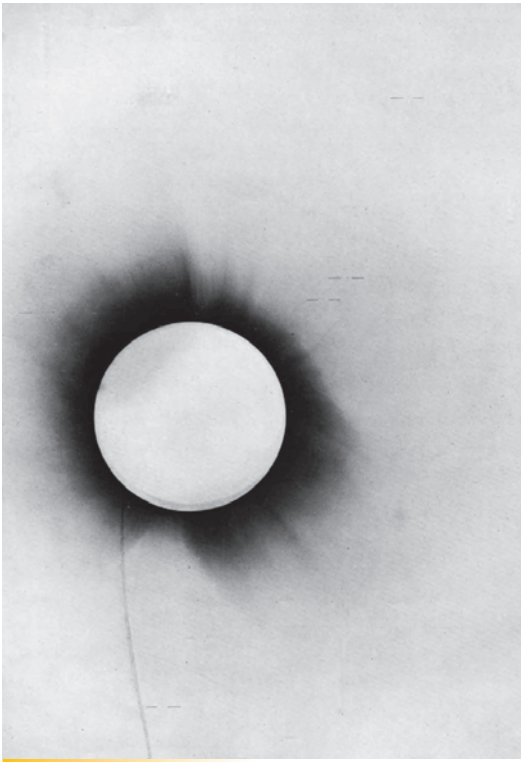
1874 Mesure de la distance Terre-Soleil grâce au passage de Vénus

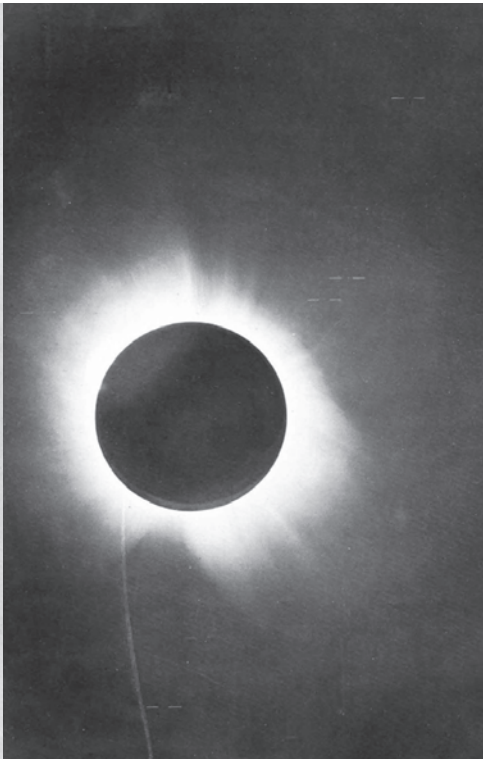
1879 Expériences de Crookes sur les tubes cathodiques

1888 Preuve de l'existence des ondes électromagnétiques par Hertz

1896 Découverte de la radioactivité par Becquerel

Découverte de l'hélium par Ramsay 1904





Sept étoiles dans le ciel du Brésil

Sur les clichés pris au Brésil lors de l'éclipse du 29 mai 1919 apparaissent clairement sept étoiles de l'amas des Hyades en arrière-plan du Soleil. La déviation de la lumière de ces étoiles va alors confirmer les prédictions d'Einstein, avec une déflexion de l'ordre de 1,74 seconde d'arc.

Négatif et positif de l'éclipse totale de Soleil, Brésil, 29 mai 1919.

« La théorie d'Einstein triomphe, l'espace est tordu. »

The New York Times, 9 novembre 1919.

La théorie du big bang

En 1927, le physicien belge Georges Lemaître (1894-1966), élève d'Arthur Eddington et père jésuite, propose l'existence d'un « atome primitif » qui serait à l'origine de l'Univers (▸ 1929). La théorie est initialement décriée par des cosmologues comme Fred Hoyle (1915-2001), qui la nomme avec mépris la théorie du « big bang » (le « grand boum »). Pourtant dans les années 1960, la découverte par des chercheurs des laboratoires Bell (▸ 1947) du rayonnement du fond cosmique dans le domaine des micro-ondes – un rayonnement fossile prédit par la théorie du big bang – revigore cette interprétation qui fait aujourd'hui consensus en astrophysique.

1919 Confirmation de la relativité

1910 — 1920 — 1930 — 1940

1911 Découverte de la supraconductivité par Kamerlingh-Onnes

1927 Hypothèse d'un univers en expansion par Georges Lemaître

1935 Prédiction de l'existence du muon par Yukawa

1943 Première pile atomique à Chicago

1928

Fleming découvre la pénicilline par hasard

Alexander Fleming
1881-1955

La contamination accidentelle d'une culture de bactéries par une moisissure met Fleming sur la piste d'une molécule miracle : la pénicilline. Cette substance deviendra un puissant agent antimicrobien employé à grande échelle pour combattre les maladies infectieuses.

Les bienfaits des vacances

En septembre 1928, à son retour de vacances, Alexander Fleming, professeur de biologie à l'hôpital Sainte-Marie de Londres, décide de désinfecter son matériel de laboratoire avant de commencer une nouvelle série d'expériences. Il remarque alors l'absence de bactéries tout autour d'une moisissure qui a accidentellement contaminé une plaque de culture bactérienne. Pour quelqu'un comme Fleming, qui s'intéresse de longue date aux propriétés antimicrobiennes de certaines molécules pour lutter contre les bactéries pathogènes, l'observation mérite bien une recherche approfondie.

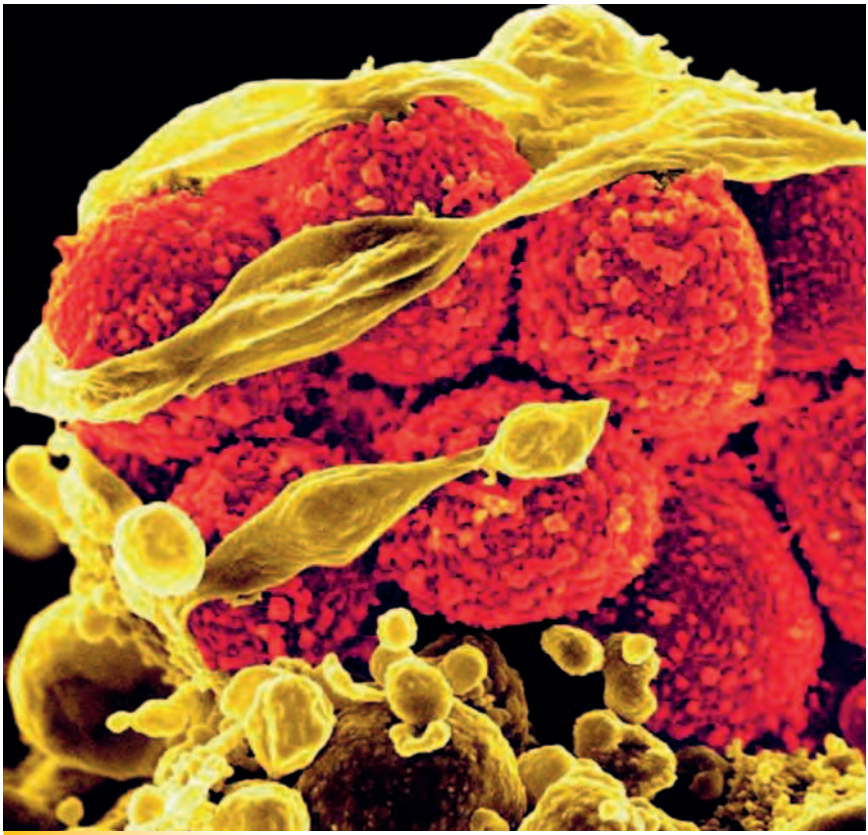
Le remède rêvé

Fleming soupçonne alors le champignon *Penicillium notatum*, à l'origine de la moisissure, de produire une substance qui inhibe la prolifération des bactéries. Il la nomme pénicilline. Dès lors, le biologiste met en évidence que la pénicilline est efficace contre de redoutables bactéries pathogènes comme les staphylocoques et les streptocoques. Il démontre également que cette substance antibiotique peut être produite et concentrée en milieu liquide, ce qui rend possible son exploitation industrielle. Toutefois, malgré une forte spécificité concernant sa cible, la pénicilline reste difficile à produire.

> *« La pénicilline est née d'une observation accidentelle. Mon seul mérite est de n'avoir jamais négligé l'observation et d'avoir abordé le sujet en bactériologiste. »*
>
> Alexander Fleming, Discours de réception du prix Nobel, 1945.

La formule de l'espoir

En 1939, onze ans après la découverte de Fleming, le biochimiste Ernst Boris Chain (1906-1979) et le pharmacologue Howard Walter Florey (1898-1968) arrivent à établir la structure moléculaire de la pénicilline et caractérisent sa composition chimique. C'est à partir de ce moment-là, en pleine guerre mondiale, que la production industrielle de l'antibiotique débute aux États-Unis. Avec la pénicilline débute ainsi l'âge d'or des antibiotiques, principaux outils de la lutte contre les infections.



L'émergence des « superbactéries »

À partir des années 1940, des souches bactériennes résistantes aux antibiotiques sont détectées en milieu hospitalier. En effet, en réaction à l'abus d'antibiotiques pour les hommes comme pour les animaux, les bactéries ont développé des mécanismes de défense vis-à-vis des molécules qui sont censées les détruire (sulfamides, pénicillines, tétracyclines…). En 2015, l'Organisation mondiale de la santé présente l'antibiorésistance comme l'un des plus grands défis sanitaires à relever au XXIe siècle.

Vue au microscope électronique de staphylocoques dorés résistants à la méticilline (jaune) tuant et s'échappant de globules blancs humains (rouge).

Science ou hasard ?

La découverte de la pénicilline par Fleming est présentée comme un exemple typique de sérendipité, c'est-à-dire comme la conséquence heureuse d'une circonstance inattendue et non recherchée. Cependant, la transformation du simple hasard en résultat scientifique nécessite toujours des connaissances pertinentes et une méthodologie adaptée. Un cas similaire a été celui du Viagra, une molécule initialement testée pour combattre l'angine de poitrine et qui, finalement, s'est avérée le remède le plus efficace pour combattre l'impuissance grâce à son effet stimulateur de l'érection.

1928 Découverte de la pénicilline

1910 — 1920 — 1930 — 1940

1910 Morgan, théorie chromosomique de l'hérédité

1918 Grande pandémie de grippe « espagnole »

1937 Theodosius Dobzhansky, *Genetics and the Origin of Species*

1943 Description du syndrome de l'autisme par Hans Asperger

1929

Edwin Hubble observe l'Univers en expansion

Edwin Hubble
1889-1953

Parmi les différents travaux qui ont établi la réalité du big bang, les observations faites par l'astronome Edwin Hubble sur les galaxies lointaines ont permis de montrer que l'Univers était en expansion.

Le télescope le plus puissant du monde

Quand Edwin Hubble arrive à l'observatoire du mont Wilson, en Californie, après avoir combattu dans l'armée américaine pendant la Première Guerre mondiale, il découvre un outil de travail hors du commun. Il s'agit du télescope *Hooker*, le plus puissant du monde à l'époque. Équipé d'un miroir de 2,5 mètres de diamètre, poli à partir d'un bloc de verre produit par Saint-Gobain, ce télescope permet à l'astrophysicien américain de faire sa première découverte quelques années plus tard.

Un Univers plus vaste qu'on croyait…

En 1923, Hubble observe des étoiles variables de type céphéide dans la nébuleuse d'Andromède. Ces étoiles ont la caractéristique d'émettre une lumière dont l'intensité varie dans le temps selon une loi découverte par l'astronome américaine Henrietta Leavitt (1868-1921), ce qui peut nous renseigner sur leur distance. C'est ainsi que Hubble montre qu'Andromède est en réalité une galaxie extérieure à la nôtre.

Cette découverte clôt le « grand débat » opposant les astronomes qui pensent que notre galaxie, la Voie lactée, remplit l'Univers, à ceux qui sont convaincus du contraire. Grâce à Hubble, on s'aperçoit que l'Univers est immensément plus grand qu'on le pensait. On estime aujourd'hui qu'il existe 200 milliards de galaxies !

Des galaxies en fuite

Hubble cherche alors à établir la distance des galaxies découvertes, toujours plus nombreuses, et compare ses données avec celles de l'astrophysicien américain Vesto Slipher (1875-1969). Ce dernier a en effet remarqué que le spectre émis par ces objets célestes (► 1859, p. 226) semble être considérablement décalé vers le rouge, ce qui est généralement interprété comme le signe d'un éloignement rapide.

En 1929, une loi très simple saute aux yeux de Hubble : plus les galaxies sont distantes de nous, plus vite elles semblent s'éloigner. On explique maintenant ce phénomène par le modèle du big bang. Né d'un état très dense, il y a environ 13,8 milliards d'années, l'Univers ne cesse de s'étendre.

Physique expérimentale et astrophysique

1870 — 1880 — 1890 — 1900

- 1874 Mesure de la distance Terre-Soleil grâce au passage de Vénus
- 1879 Expériences de Crookes sur les tubes cathodiques
- 1888 Preuve de l'existence des ondes électromagnétiques par Hertz
- 1896 Découverte de la radioactivité par Becquerel
- Découverte de l'hélium par Ramsay 1904

***Hubble* sur les pas de Hubble**

En 2010, le télescope spatial *Hubble* commence à suivre les variations d'une des étoiles céphéides étudiées, près de quatre-vingts ans plus tôt, par l'astronome Edwin Hubble. Sur ce cliché, qui représente la galaxie spirale d'Andromède, on peut voir, dans les encadrés, la variation de luminosité de cette céphéide au cours d'un mois. Les observations du télescope *Hubble* ont largement affiné les travaux de celui qui lui a donné son nom.

Étoile variable d'Andromède observée par le télescope spatial *Hubble*, 17 décembre 2010-26 janvier 2011.

Un Univers à découvrir

Aujourd'hui, on associe plus généralement le nom de Hubble au télescope, placé en orbite par la Nasa en 1990, qu'au scientifique. Après des débuts compliqués, qui ont nécessité une spectaculaire réparation dans l'espace, le télescope de 11 tonnes, dont le miroir est presque aussi grand que celui du mont Wilson, a produit une avalanche de résultats qui ont modifié l'image que l'on se faisait de l'Univers. Mais au-delà des résultats scientifiques, c'est sans doute l'incroyable beauté des structures révélée qui frappe les imaginations… et continuera de le faire jusqu'en 2021. Après quoi *Hubble* prendra une retraite bien méritée, remplacé par le télescope *James Webb*, beaucoup plus puissant.

« Toute la matière de l'univers a été créée dans la grande explosion [big bang] dans le passé lointain. »

Fred Hoyle à la BBC, 28 mars 1949.

1929 Observation de l'expansion de l'Univers

1910 — 1920 — 1930 — 1940

1911 Découverte de la supraconductivité par Kamerlingh-Onnes

1919 Confirmation de la relativité par une éclipse de Soleil

1927 Hypothèse d'un univers en expansion par Georges Lemaître

1935 Prédiction de l'existence du muon par Yukawa

1943 Première pile atomique à Chicago

1932

Le cyclotron accélère la recherche nucléaire

Ernest Orlando Lawrence
1901-1958

Le cyclotron inventé par Ernest O. Lawrence est un des instruments clés de la physique nucléaire qui émerge dans les années 1930. Il marque aussi un tournant dans les formes d'organisation de la science.

À l'origine de la physique nucléaire

Au début des années 1930, les physiciens dirigent leurs regards vers l'intérieur de l'atome. Avec des sources radioactives de radium et de polonium (► 1898), ils irradient des cibles de différents matériaux pour connaître la structure des noyaux atomiques.

C'est ainsi que James Chadwick découvre le neutron en 1932. La même année, John Cockcroft et Ernest Walton utilisent un nouvel instrument, l'accélérateur de particules, pour produire la première désintégration artificielle de noyau atomique.

Les « casseurs » d'atomes

Les premiers accélérateurs de particules utilisent des hautes tensions pour accélérer en ligne droite des particules chargées, et les projeter contre des atomes cibles afin d'essayer de « désintégrer » leurs noyaux.

Au Radiation Laboratory de l'université de Berkeley, le physicien Ernest O. Lawrence imagine une méthode alternative pour augmenter les énergies des particules chargées et donc l'efficacité de la désintégration.

Il s'inspire d'une idée du physicien norvégien Rolf Widerøe : les faire tourner dans un champ magnétique. Il invente alors un nouvel instrument, le cyclotron, qui multiplie jusqu'à vingt les énergies des particules accélérées.

La course à la radioactivité artificielle

Avec son cyclotron et l'espoir de produire des radio-isotopes pour la recherche médicale, le laboratoire de Lawrence récolte d'abondants financements. Néanmoins, les premiers radio-isotopes artificiels sont obtenus en 1934 par Frédéric Joliot et Irène Curie – fille de Marie Curie – à l'Institut du radium de Paris (► 1898).

Malgré cet « échec », le cyclotron de Berkeley devient incontournable pour la recherche nucléaire. Le cyclotron est aussi l'ancêtre des grands accélérateurs de particules contemporains, comme ceux du CERN (► 1983).

Une course au gigantisme

Depuis le premier prototype de cyclotron, qui tient dans une poche, les ingénieurs de Berkeley développent des modèles toujours plus grands : 28 et 69 cm de diamètre en 1932, 94 cm en 1937, 152 cm en 1939 et 467 cm en 1946. À chaque nouveau modèle, les particules accélérées acquièrent davantage d'énergie. Une version modifiée – le calutron – est utilisée dans le projet Manhattan pour enrichir l'uranium destiné aux premières bombes atomiques.

Le synchrocyclotron de Berkeley, 1945.

« L'époque où le scientifique, aussi dévoué soit-il, pouvait faire des progrès significatifs seul et sans aide matérielle est révolue. »

Ernest O. Lawrence, *Discours d'acceptation du prix Nobel de physique*, 1940.

Big science

Les recherches du Radiation Laboratory de Berkeley symbolisent une nouvelle façon de faire de la science à grande échelle : la *big science*. Cette forme d'organisation se caractérise par le travail interdisciplinaire de grandes équipes scientifiques autour de grands équipements, dont la mise en place requiert d'importants investissements financiers. Pendant la Seconde Guerre mondiale et la guerre froide, la *big science* reçoit un financement accru de l'Armée, dont le projet Manhattan (► 1945) est un bon exemple.

1932 Invention du cyclotron

1910 | 1920 | 1930 | 1940

1911 Découverte de la supraconductivité par Kamerlingh-Onnes

1919 Confirmation de la relativité par une éclipse de Soleil

1927 Hypothèse d'un univers en expansion par Georges Lemaître

1935 Prédiction de l'existence du muon par Yukawa

1943 Première pile atomique à Chicago

1934

Bourbaki naît dans un café parisien

Nouvel Euclide du XXe siècle, Bourbaki n'a pourtant jamais existé. Ce pseudonyme, adopté par un collectif de mathématiciens, symbolise leur ambition de reconstruire l'ensemble des mathématiques sur une base rigoureuse et abstraite.

Oui, mon général !

À la fin de l'année 1934, un groupe de jeunes scientifiques se réunit dans un café parisien pour entreprendre un projet collectif. Deux ans plus tard, il adopte un nom de plume aux sonorités étrange, N. Bourbaki. En mettant de côté leur ego scientifique pour se fondre dans le collectif, ils s'inventent un maître fictif qu'ils prénommeront bientôt Nicolas. Le patronyme Bourbaki appartient en fait à un général français de la guerre de 1870. Il semble que les élèves de l'École normale supérieure s'en servaient dans leurs canulars, à l'époque où les futurs membres du groupe y faisaient leurs études.

Euclide au café

Ces membres s'appellent André Weil, Jean Dieudonné ou encore Henri Cartan. Enseignants universitaires, ils commencent à réfléchir, dès décembre 1934, dans un café du 5e arrondissement de Paris, à la rédaction d'un nouveau traité d'analyse mathématique. Bientôt, leur projet prend une ampleur folle. Sur les traces d'Euclide (► – 300), le groupe Bourbaki cherche à moderniser les mathématiques sur des bases générales, abstraites et unifiées, en s'inspirant de David Hilbert (► 1900). Consacré à la théorie des ensembles, le premier fascicule des *Éléments de mathématique* de Bourbaki paraît en 1940.

Pour l'honneur de l'esprit humain

Après la Seconde Guerre mondiale, le collectif se renouvelle tout en s'ouvrant à des collaborations étrangères, notamment américaines. Symbole d'une réaffirmation de la puissance des mathématiques pures, autonomes et développées « pour l'honneur de l'esprit humain » (selon Dieudonné), Bourbaki exerce une grande influence sur l'image et le contenu des mathématiques de cette époque. Ses membres fondateurs deviennent des acteurs de premier plan au sein de la communauté nationale et internationale. Bien qu'ils ne soient pas à l'origine de la réforme de l'enseignement des mathématiques dans les années 1970, le nom de Bourbaki devient synonyme de « maths modernes ».

Mathématiques et physique théorique

1870 — 1880 — 1890 — 1900

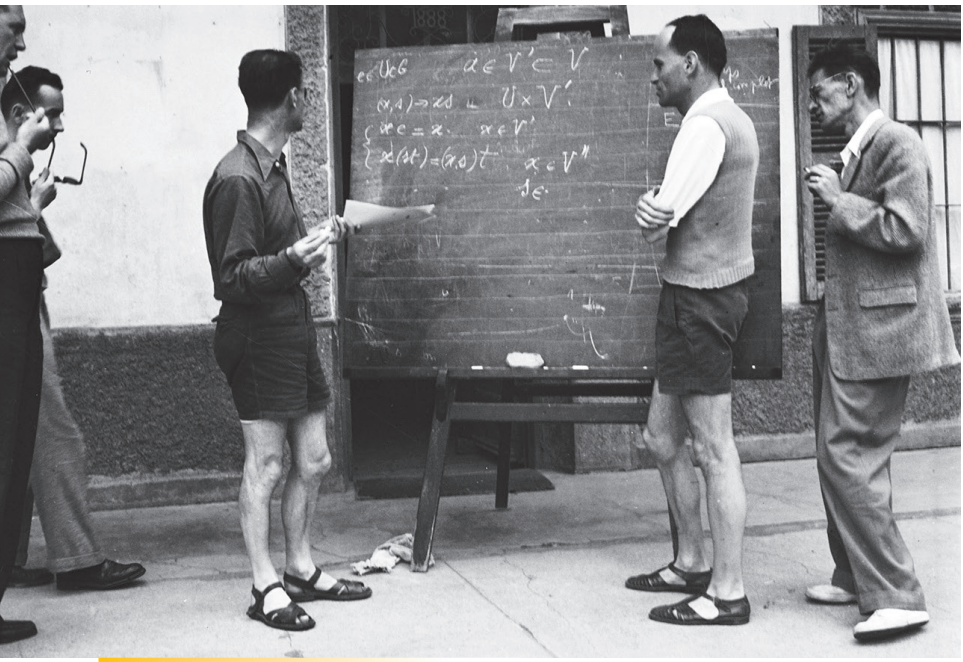
1873 Georg Cantor, théorie des ensembles

1874 Sofia Kovalevskaïa, première doctoresse en mathématiques en Allemagne

Boltzmann, théorie cinétique des gaz 1877

1892-1899 Poincaré, méthodes nouvelles de la mécanique céleste

Einstein, théorie de la relativité restreinte 1905



Équations en culottes courtes

Les écrits publiés sous le nom de Bourbaki font l'objet de discussions intenses lors de congrès réguliers, souvent organisés pendant l'été. Autour du tableau noir, les débats sont parfois vifs, avant qu'on décide d'en reprendre entièrement la rédaction. Le traité avance lentement… et, bien que le groupe existe encore, n'est toujours pas terminé.

De gauche à droite : Jean Dieudonné, Jacques Dixmier, André Weil, Laurent Schwartz et Roger Godement, lors d'un congrès Bourbaki à Pelvoux en 1951.

« Le traité prend les mathématiques à leur début, et donne des démonstrations complètes. […] Le mode d'exposition suivi […] est axiomatique et abstrait : il procède le plus souvent du général au particulier. »

N. Bourbaki, Mode d'emploi des *Éléments de mathématique*, 1940.

La mode est aux structures

Dans les années troublées de la Seconde Guerre mondiale, deux intellectuels français exilés se rencontrent à New York. André Weil, membre de Bourbaki, y croise la route de l'anthropologue Claude Lévi-Strauss (1908-2009). Dans un ouvrage paru en 1949, ce dernier étudie les « structures » élémentaires de la parenté et inaugure une nouvelle approche des sciences humaines qui connaîtra un énorme succès, le structuralisme. La notion de « structure » est aussi aux fondements des *Éléments de mathématique* de Bourbaki. En annexe du livre de Lévi-Strauss, Weil applique la théorie mathématique des groupes aux alliances matrimoniales. En fin de compte, le structuralisme des sciences sociales ne s'inspirera que très peu du structuralisme formel de Bourbaki.

Naissance de Bourbaki **1934**

1910 — 1920 — 1930 — 1940

1913 Modèle de l'atome de Niels Bohr

1917 Einstein, théorie de la relativité générale

1925 Équation de Schrödinger

1937 Machine universelle de Turing

1944 L'économie devient un jeu

Oskar Morgenstern
1902-1977

Inspirés par la théorie des jeux, deux émigrés européens installés aux États-Unis fournissent un nouveau cadre mathématique à la théorie économique. Leurs concepts et leurs méthodes vont peu à peu trouver de nombreuses applications.

Deux réfugiés à Princeton

Le mathématicien et physicien d'origine hongroise John von Neumann (1903-1957) a toujours aimé les jeux de stratégie. C'est auprès de David Hilbert (► 1900) qu'il démontre, en 1928, son premier théorème de la théorie des jeux, le théorème du « minimax », où il prouve l'existence d'une stratégie optimale pour gagner certains jeux impliquant deux joueurs. Dès 1930, von Neumann s'établit aux États-Unis et se trouve bientôt rejoint, avec l'arrivée des nazis au pouvoir, par d'autres scientifiques européens comme Albert Einstein (► 1905, 1919) et Kurt Gödel.

Originaire de Vienne, l'économiste Oskar Morgenstern (1902-1977) séjourne ainsi à Princeton au moment de l'annexion de l'Autriche en 1938 et décide d'y rester. Après avoir écrit un article sur l'application de la théorie des jeux à l'économie, Morgenstern sollicite l'avis de von Neumann. De fil en aiguille, c'est un livre entier qu'ils écrivent en 1944 : *Théorie des jeux et comportement économique*.

> *« On ne peut arriver à l'énoncé exact et à la solution [des problèmes d'économie] qu'à l'aide de méthodes mathématiques qui divergent considérablement des techniques employées par l'économie mathématique d'hier ou d'aujourd'hui. »*
>
> John von Neuman et Oskar Morgenstern, *Théorie des jeux et comportement économique*, 1944.

L'économie et la théorie des jeux

Dans la conception de l'économie de Morgenstern et von Neumann, les « jeux » désignent toute situation d'interaction dans laquelle plusieurs individus disposent d'un ensemble de choix, appelés stratégies, qui leur permettent d'obtenir des « gains » à maximiser. Cette approche renouvelle sensiblement les méthodes des économistes et contribue à diversifier leurs outils mathématiques : algèbre, combinatoire et probabilités viennent compléter le traditionnel calcul différentiel. Rapidement, le succès de la théorie des jeux dépasse largement la discipline économique. Les élections, l'évolution des espèces, la sociologie des organisations, ou même la stratégie de la guerre nucléaire seront étudiées de cette manière.

Mathématiques et physique théorique

1870 — 1880 — 1890 — 1900

1873 Georg Cantor, théorie des ensembles

1874 Sofia Kovalevskaïa, première doctoresse en mathématiques en Allemagne

Boltzmann, théorie cinétique des gaz 1877

1892-1899 Poincaré, méthodes nouvelles de la mécanique céleste

Einstein, théorie de la relativité restreinte 1905

Jeux dangereux

Pendant la guerre froide, le *think tank* ou laboratoire d'idées américain, connu sous le nom de RAND Corporation, applique la théorie des jeux aux stratégies de la guerre nucléaire. Savants et militaires, en particulier l'économiste Thomas Schelling (1921-2016), prix Nobel d'économie en 2005, vont jusqu'à imaginer des *serious games* et développent la doctrine de l'équilibre de la terreur selon laquelle nulle puissance ne doit pouvoir espérer tirer bénéfice d'un conflit nucléaire.

Des chercheurs font la démonstration d'un jeu de stratégie aux administrateurs de la RAND Corporation, Santa Monica, 1966.

Un Nobel pour 28 pages

En 1950, le mathématicien américain John Nash (1928-2015) soutient une thèse sur la théorie des jeux qui ne compte que 28 pages et lui vaut le prix Nobel d'économie 44 ans plus tard. Il y explore les propriétés de ce qu'on appellera l'« équilibre de Nash ». Dans un jeu non coopératif entre plusieurs joueurs, il existe au moins une stratégie qui maximise les gains de chacun, pourvu qu'ils agissent rationnellement. Cette vision de l'économie comme un jeu non coopératif entre agents rationnels aura un impact profond sur la discipline.

L'invention de la modélisation mathématique

C'est par abus de langage qu'on parle de modèles mathématiques avant le début du XX^e^ siècle. Dès ses premiers travaux sur la mécanique quantique, von Neumann a bien compris que les mathématiques classiques, comme l'analyse inventée par Newton (► 1687), ne peuvent suffire à résoudre tous les types de problèmes posés par les sciences de son époque. Dès lors, il n'aura de cesse d'imaginer de nouveaux « modèles », c'est-à-dire des utilisations originales de théories mathématiques modernes à toutes sortes de situations. À part la théorie des jeux, son plus célèbre modèle est celui qui associe l'ordinateur à une « machine de Turing », un concept abstrait qui exprime la possibilité de résoudre un problème calculatoire par un procédé linéaire (► 1945).

La théorie synthétique de l'évolution

En un siècle, la conception du vivant est complètement bouleversée. On passe d'une nature fixe créée par Dieu à une conception dynamique de la vie. Une vie qui serait en constante évolution, *via* les interactions avec son environnement et celles qui se jouent au niveau de l'ADN.

Une évolution sans gènes

Dès le XVIII^e^ siècle, Georges Buffon (► 1739) remet en question la Création et imagine une nature en constante évolution. Georges Cuvier (► 1812) postule l'existence de catastrophes qui, en détruisant certaines espèces, permettraient à d'autres de prospérer. Lamarck (► 1809), enfin, envisage une transformation des espèces *via* une adaptation progressive à leur environnement. C'est *L'Origine des espèces*, de Charles Darwin (► 1859), qui marque le temps zéro de la biologie évolutive moderne. Contrairement à Cuvier, il explique la diversité du vivant par la « sélection naturelle », un mécanisme qui agit sur la survie des animaux et des plantes par le biais de la reproduction sexuée.

Le temps des mutations

Dans l'ombre de Darwin, Gregor Mendel (► 1864) fait des expériences sur la reproduction des petits pois. Il en déduit les lois de l'hérédité, qui ne seront largement diffusées qu'au début du XX^e^ siècle, par le botaniste néerlandais Hugo De Vries (1848-1935). Au cours de ses recherches, ce dernier observe l'apparition de changements morphologiques brusques entre générations de plantes, qu'il nomme « mutations ». Il en conclut, contrairement à Darwin, que l'évolution fonctionne par à-coups. Bientôt, les chromosomes sont identifiés comme le siège des facteurs héréditaires, dorénavant appelés « gènes ». Les lois de l'hérédité sont donc le résultat de mutations aléatoires et de l'échange des chromosomes lors de la reproduction.

La synthèse néodarwinienne

C'est dans les années 1930 que la théorie darwinienne de l'évolution et la génétique moderne se rejoignent. Cette théorie néodarwinienne, ou théorie synthétique de l'évolution, est exposée en 1937 par le généticien Theodosius Dobzhansky (1900-1975), un émigré russe qui a travaillé avec T.H. Morgan (► 1910). Dans *Genetics and the Origin of Species*, il montre que les mutations fournissent des variations dans le

matériel génétique dont la propagation au sein de populations données est assurée, comme le pensait Darwin, par la sélection naturelle. C'est un changement majeur de perspective. Pour les néodarwinistes, la population interféconde (c'est-à-dire, le plus souvent, l'espèce), et non plus l'individu, est le niveau le plus adapté pour l'analyse des mécanismes évolutifs. Chaque individu est porteur d'un jeu unique de gènes, mais c'est seulement dans la population, et au fil des générations, que les effets de la sélection naturelle sont mis en évidence.

Formes artistiques de la nature

Entre 1899 et 1904, le zoologue allemand Ernst Haeckel (1834-1919) publie une centaine de planches spectaculaires illustrant la diversité du monde vivant. Souvent considéré comme le père de l'écologie, Haeckel contribue grandement à la diffusion des idées de Darwin, non sans les trahir.

Ernst Haeckel, *Kunstformen der Natur*, 1904.

« Rien n'a du sens en biologie, hors du cadre de l'évolution. »

Theodosius Dobzhansky, *American Biology Teacher*, 1973.

La course aux molécules

Isolée dès le XIXe siècle, la molécule d'ADN est désormais associée aux chromosomes. En utilisant les clichés de Rosalind Franklin (1920-1958), James Watson et Francis Crick (▶ 1953) mettent en évidence la célèbre double hélice. Peu après, les Français Jacques Monod (1910-1976) et François Jacob (1920-2013) interprètent le mécanisme de l'expression des gènes et reçoivent, en 1965, le prix Nobel. Avec ces découvertes capitales, l'écriture de l'histoire de la vie sous la forme d'acides nucléiques, alignés tout au long du brin d'ADN, semble être à la portée des scientifiques.

La nouvelle physique de l'infiniment petit

Au début du XX^e siècle, les physiciens sondent le monde atomique. Les nouveaux objets et phénomènes qu'ils découvrent bouleversent alors des principes philosophiques communément admis. Une nouvelle théorie, la physique quantique, se propose comme cadre d'interprétation.

Une hypothèse audacieuse

Le 8 octobre 1900, Max Planck (1858-1947), professeur de physique à l'université de Berlin, tente de modéliser le rapport entre la radiation émise par un corps chaud et sa température à partir des résultats expérimentaux obtenus par les physiciens du Laboratoire impérial de physique technique. Planck réussit à obtenir une formule, mais doit pour cela introduire une hypothèse *ad hoc* : l'énergie est émise par la matière de manière discontinue, sous forme de « paquets » (ou « quanta ») dont la taille est un multiple entier d'une quantité fixe *h*, qu'on appellera plus tard la « constante de Planck ».

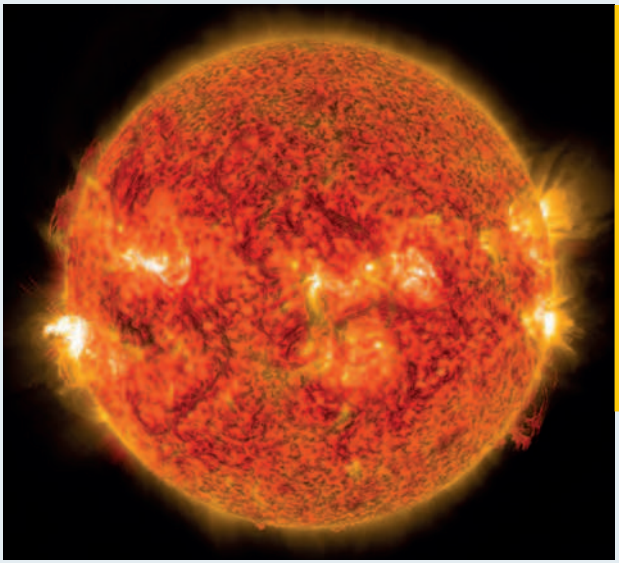
La révolution quantique

Pour Planck, l'idée que l'énergie se transmet en paquets discrets ou « quanta » est seulement une astuce mathématique, sans rapport avec la réalité physique. Il revient à la nouvelle génération de physiciens, et notamment à Albert Einstein (1879-1955) et Niels Bohr (1885-1962), d'interpréter son hypothèse d'une manière plus radicale. Ainsi, en 1905, Einstein explique l'effet photoélectrique (l'émission d'électrons par certains matériaux sous l'action de la lumière) en supposant que la lumière se propage par petits paquets ou quanta : les photons (► 1905). En 1913, Bohr explique l'émission de spectres lumineux à partir d'un modèle quantique de l'atome.

Une nouvelle mécanique

Après la Première Guerre mondiale (► 1915), Niels Bohr et d'autres physiciens théoriques comme Werner Heisenberg, Max Born, Wolfgang Pauli, Louis de Broglie ou Erwin Schrödinger développent des concepts et des outils mathématiques pour étudier le monde à l'échelle microscopique. Les principes de la physique quantique sont formalisés.

Malgré son utilité et son succès prédictif, cette nouvelle discipline fait l'objet d'une intense controverse philosophique. En effet, dans le monde quantique, les corps semblent obéir à des règles contraires au sens commun : les objets n'ont plus de position et de vitesse fixes, mais se manifestent par des distributions de probabilités. Ils peuvent être à la fois des ondes et des corpuscules jusqu'à ce qu'on les mesure… En 1927, les lois quantiques sont interprétées par Bohr et Heisenberg comme résultant du caractère intrinsèquement probabiliste et indéterministe du monde à l'échelle atomique. Il s'agit de l'« interprétation de Copenhague ».



Le modèle du corps noir

L'hypothèse des quanta de Planck émerge d'une application du modèle théorique du « corps noir ». Introduit par Gustav Kirchhoff (► 1859, p. 226), ce modèle suppose que l'énergie émise sous forme de radiation par un objet, comme le Soleil, dépend uniquement de sa température.

Éruption solaire capturée par le satellite Solar Dynamics Observatory.

Le débat Bohr-Einstein

Si l'« interprétation de Copenhague » est aujourd'hui communément acceptée, ce ne fut pas le cas instantanément. Après le congrès Solvay de 1927, Bohr et Einstein s'engagent dans un intense débat sur la façon d'interpréter philosophiquement la nouvelle mécanique. Einstein, qui ne veut pas accepter une interprétation indéterministe du monde, imagine des expériences qui permettraient de réfuter le principe d'Heisenberg. Mais Bohr réussit toujours à trouver des erreurs dans son raisonnement. Einstein acceptera finalement le principe d'indétermination, restant toujours sceptique sur son caractère fondamental. Pour lui, il s'agit d'une limitation associée à l'acte de mesurer, et non pas une caractéristique fondamentale de l'Univers.

« Une vérité nouvelle en science n'arrive jamais à triompher en convainquant les adversaires et en les amenant à voir la lumière, mais plutôt parce que finalement ces adversaires meurent et qu'une nouvelle génération grandit, à qui cette vérité est familière. »

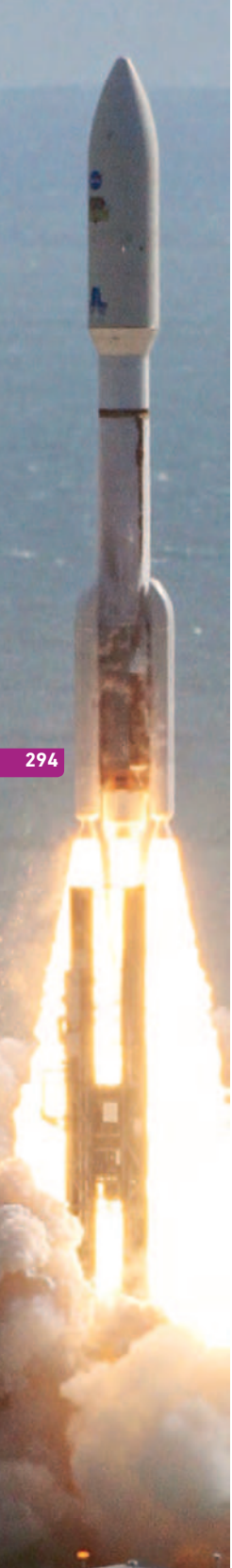
Max Planck, *Autobiographie scientifique et derniers écrits*, 1948.

La grande accélération

De 1945 à nos jours

Depuis le milieu du XXe siècle, l'être humain transforme ses rapports avec le monde naturel plus radicalement que jamais. À mesure qu'il affine sa compréhension de la nature et qu'il la contrôle de mieux en mieux, son activité s'accélère à un rythme de plus en plus rapide. Au début du XXIe siècle, cette « grande accélération » ne montre aucun signe d'essoufflement, même s'il est désormais clair que son impact sur le système Terre est un gigantesque bouleversement, comme la planète n'en a pas connu depuis plusieurs millions d'années.

Lancement d'une fusée Atlas V au cap Canaveral, 26 novembre 2011.



La grande accélération

De 1945 à nos jours

Une nouvelle frontière

La Seconde Guerre mondiale a prouvé qu'un État moderne doit se doter d'une politique de recherche scientifique et d'innovation technologique. Si l'explosion des premières bombes atomiques frappe immédiatement les esprits (► 1945, p. 300), le développement des premiers ordinateurs (► 1945, p. 298), celui des missiles V2, ancêtres des fusées de l'ère spatiale (► 1957) ou encore la production industrielle de pénicilline (► 1928), sont immédiatement perçus comme constitutifs d'un nouveau monde technoscientifique avec son lot de promesses et de menaces (► dossier, p. 354-355). L'ingénieur Vannevar Bush (1890-1974) suggère alors au président Roosevelt, dans le célèbre rapport *Science : la frontière sans fin*, d'enrôler les savants dans la poursuite d'une plus grande prospérité nationale, d'une défense de plus en plus puissante et d'une véritable guerre contre les maladies.

L'avènement de la « Big science »

La guerre froide, où les blocs capitaliste et communiste s'opposent mais partagent une même idéologie productiviste et une même foi dans les bienfaits du développement technoscientifique, fait émerger une nouvelle conception de la recherche scientifique, qu'on désigne souvent en anglais comme la *Big science* ou science lourde. Désormais, tout s'accélère : les budgets explosent, les instruments de mesure deviennent gigantesques ou incroyablement précis, certains projets internationaux peuvent réunir jusqu'à un millier de chercheurs.
Au CERN, près de Genève, on construit une nouvelle Europe autour d'accélérateurs de particules (► 1983).

La naissance du biomédical

Des techniques de visualisation sophistiquées révèlent la structure de l'ADN (► 1953) qui permet de mieux comprendre, au niveau moléculaire, les mécanismes du vivant. Grâce à cette avancée majeure, la connaissance des pathologies humaines et la prise en charge de la santé font de grands progrès : mise au point de la pilule contraceptive (► 1954), greffes d'organes (► 1958), développement de nouveaux traitements, notamment contre le paludisme (► 1972), etc. Toutefois la connaissance du vivant ne se limite pas au domaine moléculaire. L'histoire de l'évolution s'éclaire grâce à la découverte de nombreux fossiles, comme celui de Lucy (► 1959), et de leur datation par des méthodes provenant de la physique nucléaire (► 1949). Même les continents, découvre-t-on, ont une histoire (► 1968).

Les nouveaux horizons de la complexité

Dans les années 1960, les scientifiques prennent conscience de l'interdépendance des systèmes qu'ils étudient. Ils soulignent le rôle central de la coopération entre organismes dans l'évolution (► 1966) ou la dégradation alarmante de la biodiversité causée par l'usage massif des pesticides (► 1962). On s'aperçoit qu'un système simple peut très vite devenir chaotique si on n'y prend garde (► 1963). Les ordinateurs (► 1977), désormais en réseau (► 1969, p. 326), se placent au cœur des pratiques scientifiques et renforcent l'idée qu'il est maintenant possible de comprendre les systèmes complexes, y compris de modéliser le réchauffement de la Terre (► 1990). Et si, comme nous le rappelle l'exemple de Tchernobyl (► 1986), la menace d'une catastrophe n'est jamais loin, les technosciences offrent toujours l'espoir d'un plus grand contrôle du vivant (► 2012) et peut-être même de la pensée artificielle (► 2017).

1949
Invention des méthodes de datation au carbone 14

1954
Mise au point de la pilule contraceptive

1962
Rachel Carson, *Le Printemps silencieux*

1945
Architecture « de von Neumann » des ordinateurs

1963
Modèle chaotique de Lorenz

1966
Margulis met la coopération au cœur de l'évolution

1940 **1950** **1960** **1970**

1945 Adoption de la charte des Nations unies

Guerre de Corée 1950-1953

1954-1962 Guerre d'Algérie

1968 Mouvements de protestation étudiants dans plusieurs pays

1957
Traité de Rome instituant la Communauté économique européenne

1973
Premier choc pétrolier, crise économique mondiale

1945
Explosion des premières bombes atomiques

1953
Découverte de la structure de l'ADN

1968
Démonstration de la tectonique des plaques

1969
Premiers pas de l'homme sur la Lune

1947
Invention du transistor dans les Bell Labs

1957
Année géophysique internationale

1958
Premières greffes de moelle osseuse

1959
Découverte de fossiles d'australopithèques

1972
Remède contre le paludisme par Tu Youyou

1977
Commercialisation
de l'ordinateur personnel Apple II

1983
Découvertes des bosons W et Z au CERN

1985
Assassinat de la primatologue Dian Fossey

2012
Découverte des
« ciseaux génétiques »
CRISPR

1980 1990 2000 2010 2020

1980-1988 Présidence de Ronald Reagan aux États-Unis

1989 Chute du mur de Berlin

1992 Sommet de la Terre à Rio de Janeiro

**2001 Attentat terroriste contre
les tours du World Trade Center à New York**

La Chine devient la première puissance économique mondiale 2014

1977
Lancement
des sondes
Voyager

1986
Accident
nucléaire
à la centrale
de Tchernobyl

1990
Premier rapport
du GIEC sur le
réchauffement global

2001
Lancement
de l'encyclopédie
Wikipédia

1992
Découverte des premières
planètes extrasolaires

2017
Montée en puissance
de l'intelligence
artificielle

1945

L'architecture de l'ordinateur se dessine

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'ébauche d'un projet de calculateur universel à grande vitesse est diffusée auprès des ingénieurs anglais et américains. Son architecture novatrice servira de base aux futurs ordinateurs.

Des monstres peu efficaces

En 1942, la Moore School of Electrical Engineering de l'université de Pennsylvanie recrute des ingénieurs pour concevoir une machine à calculer capable de fonctionner à grande vitesse. L'enjeu est de taille. En pleine guerre mondiale, les besoins en calcul, notamment pour la balistique (▸ 1745), ne sont pas satisfaits par les moyens existants. Un groupe de travail se constitue autour de Herman Goldstine (1913-2004), avec l'ingénieur électricien John Eckert (1919-1995) et le physicien John Mauchly (1907-1980).

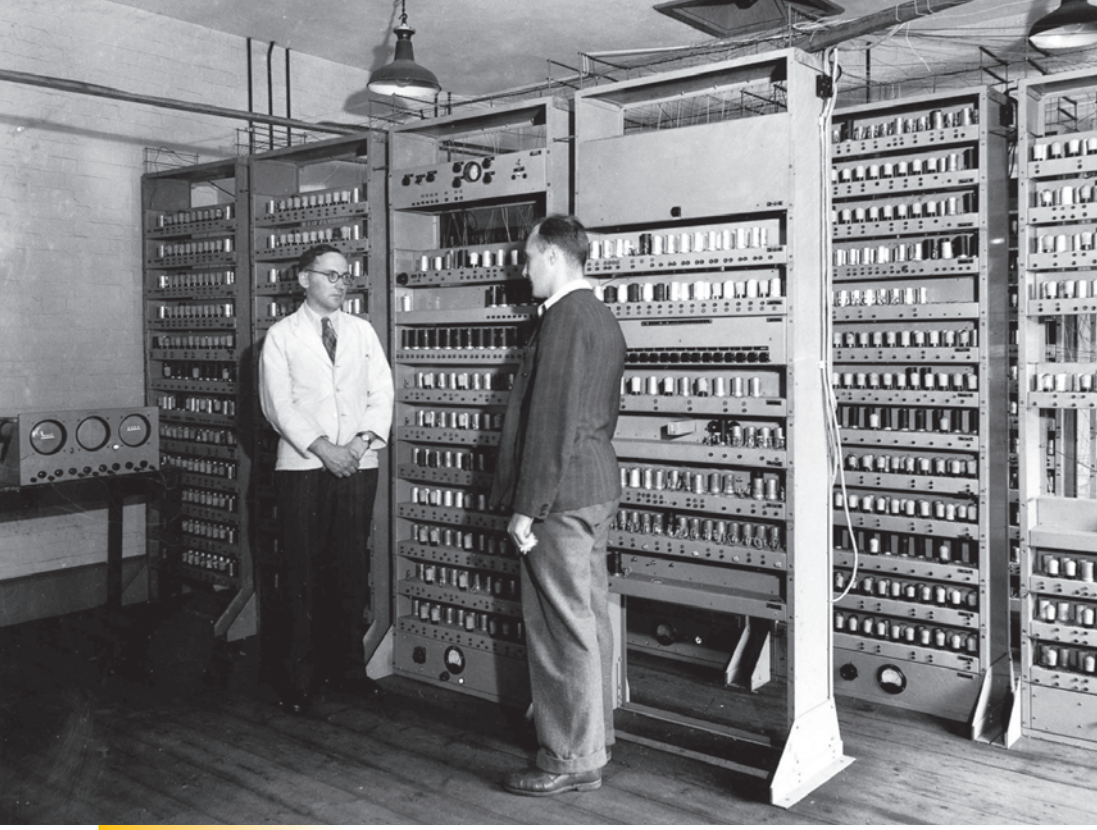
La première machine construite entre 1943 et 1945 est baptisée ENIAC. Mais malgré ses 30 tonnes et ses 30 mètres de long, elle ne peut résoudre que de petites séries de problèmes récurrents, « programmée » par des centaines de câbles branchés en façade. Eckert et Mauchly envisagent alors une seconde machine, l'EDVAC, avec un schéma de fonctionnement plus performant et surtout plus souple, capable de résoudre tout type de problème numérique.

Une architecture visionnaire

> *« Le rapport [sur l'EDVAC] est le document le plus important jamais écrit sur le calcul et les ordinateurs. »*
>
> Herman Goldstine, *The Computer from Pascal to von Neumann*, 1972.

John von Neumann (▸ 1944), célèbre mathématicien, rejoint le groupe à titre de consultant. Il rédige une première synthèse concernant cette nouvelle machine, le « *First Draft of a Report on the EDVAC* », et l'envoie à Goldstine. Ce dernier dactylographie le document le 30 juin 1945 et, contrairement aux habitudes de confidentialité, le distribue largement dans le milieu des chercheurs.

Cette note décrit une architecture rendant le système autonome. Les instructions, au lieu d'être codées par des commutateurs et des câbles externes, sont enregistrées dans une mémoire interne qui stocke également, pendant tout le temps du calcul, les valeurs des diverses variables. Cette architecture, avec le concept de machine universelle énoncé par Alan Turing (1912-1954) en 1936, servira de modèles aux premiers ordinateurs numériques commerciaux.



Les premiers « vrais » ordinateurs

L'EDVAC ne sera pas le premier ordinateur en fonctionnement. Les Anglais, notamment grâce à Turing, ont en effet pris de l'avance pendant la Seconde Guerre mondiale. Dès 1949, les universités anglaises de Cambridge et de Manchester font tourner les premiers programmes enregistrés sur leurs propres calculateurs universels électroniques, l'EDSAC et le Manchester Mark I, autrement dit sur ce que beaucoup considèrent comme les premiers « vrais » ordinateurs !

L'EDSAC, premier ordinateur réalisé à l'université de Cambridge sous la direction de Maurice Wilkes (à gauche), avec Bill Renwick (à droite), 17 juillet 1949.

Une paternité remise en question

La première ébauche décrivant l'EDVAC est signée du seul nom de von Neumann. On considère dès lors le mathématicien comme son seul inventeur. Or, si von Neumann a significativement participé à la conception du calculateur, les apports d'Eckert, Mauchly et de quelques autres ingénieurs sont déterminants. Après guerre, des querelles les opposent les uns aux autres quant à la paternité des brevets et pour l'usage scientifique ou commercial des machines. La justice tranche en n'autorisant aucun brevet sur les concepts. À la suite de ces divergences, trois versions de l'EDVAC seront construites entre 1951 et 1952 : l'une à la Moore School, la seconde à Princeton sous la supervision de von Neumann, la troisième par l'entreprise d'Eckert et de Mauchly.

1945

Une bombe atomique explose en plein désert

Robert Oppenheimer
1904-1967

Le 16 juillet 1945, le premier essai nucléaire de l'histoire a lieu dans le désert du Nouveau-Mexique. Quelques jours plus tard, deux bombes atomiques sont larguées sur le Japon. Un nouvel ordre mondial émerge, plaçant les sciences au centre de la géopolitique globale.

Des atomes qui explosent

Fin 1938, des physiciens allemands découvrent que le bombardement d'atomes d'uranium par des neutrons lents entraîne leur fission. On envisage bientôt la possibilité de produire des réactions nucléaires en chaîne afin de relâcher d'énormes quantités d'énergie.

Pendant la Seconde Guerre mondiale, l'Allemagne, le Japon, le Royaume-Uni, l'Union soviétique et les États-Unis lancent des projets de recherches dont l'objectif est de développer la bombe atomique. Dirigé par le colonel américain Leslie R. Groves (1896-1970), le « projet Manhattan » est le plus important d'entre eux.

Top secret

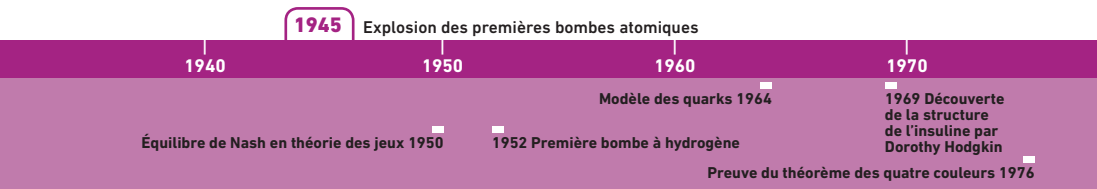
L'effort de guerre américain soutient le projet Manhattan, qui débute par la production du premier réacteur nucléaire, à Chicago, en 1942. Cette « pile » atomique, ainsi que la mobilisation de l'industrie chimique, permet de passer à la production de plutonium et d'uranium enrichi à grande échelle.

Au même moment, dans le plus grand secret, un millier de physiciens et d'ingénieurs s'installent dans le Nouveau-Mexique et travaillent au Laboratoire national de Los Alamos, sous la direction de Robert Oppenheimer (1904-1967), pour concevoir un prototype fonctionnel de bombe atomique.

Une arme de destruction massive

Le premier essai de la bombe, dont le nom de code est Trinity, a lieu le 16 juillet 1945 dans le désert du Nouveau-Mexique. Dès le 6 août, les États-Unis larguent une autre bombe atomique sur la ville japonaise d'Hiroshima, puis le 9 août sur Nagasaki, provoquant la mort de centaines de milliers de personnes.

Malgré des tentatives de contrôle à la fin de la Seconde Guerre mondiale, et l'opposition de quelques scientifiques renommés comme Albert Einstein (▸ 1905), les bombes atomiques prolifèrent et amorcent une nouvelle époque, caractérisée par l'équilibre de la terreur et un rôle grandissant des sciences dans les affaires géopolitiques (▸ 1944).



Les images de la bombe

L'image du « champignon » nucléaire est emblématique du XXe siècle. Objet de fascination et d'inquiétude, elle incarne le pouvoir de la science moderne.

Image du premier essai nucléaire, Trinity, 16 juillet 1945.

« Nous savions que le monde ne serait plus le même. Certains ont ri, certains ont pleuré. La plupart étaient silencieux. Je me suis souvenu d'une ligne du texte hindou, la Bhagavad-Gita : "Maintenant je suis la Mort, le destructeur des mondes". Je suppose que nous avons tous pensé cela, d'une façon ou d'une autre. »

Robert Oppenheimer, dans le documentaire de la NBC, *The Decision to Drop the Bomb*, 1965.

La bombe H et les retombées nucléaires

En 1952, la bombe à hydrogène est mise au point par l'armée des États-Unis. Mille fois plus puissante que la bombe d'Hiroshima, l'explosion d'une bombe H produit des retombées radioactives qui se diffusent dans toute l'atmosphère, et soulève la première controverse environnementale globale. Suite à de nombreuses protestations, un traité signé en 1963 entre les États-Unis et l'Union soviétique – non ratifié par la France et la Chine – interdit les essais nucléaires atmosphériques.

Mathématiques et sciences de la matière

1980 — 1990 — 2000 — 2010 — 2020

1983 Découverte des bosons W et Z au CERN

1986 Découverte de la supraconductivité à haute température

1994 Preuve du théorème de Fermat par Andrew Wyles

2012 Découverte du boson de Higgs au CERN

1947

La compagnie Bell Telephone invente le transistor

Le 23 décembre 1947, une petite équipe des laboratoires Bell écoute un signal audio amplifié par un nouveau composant : le transistor. Cet élément minuscule va révolutionner la musique, la communication ou encore le calcul.

Une amplification laborieuse

Pendant l'entre-deux-guerres, on dispose de tubes électroniques pour amplifier les signaux radar ou radio (▸ 1888, p. 252). Mais ces éléments laissent à désirer du fait de leur lenteur, leur taille, leur fragilité, leur échauffement et leur coût.

Les physiciens sont convaincus que de nouveaux composants, faits de métaux, d'oxydes et de semi-conducteurs comme le silicium ou le germanium, pourraient les remplacer. Mais ces matériaux restent incompris : leurs propriétés conductrices sont déroutantes et ne se laissent pas facilement maîtriser par les expérimentateurs.

Un joyeux Noël aux Bell Labs !

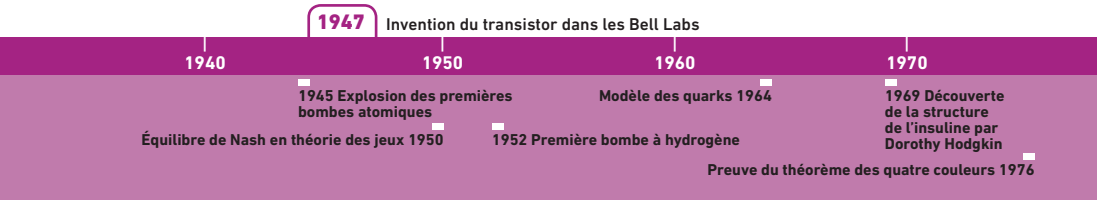
C'est alors qu'en 1946, le physicien John Bardeen (1908-1991) des laboratoires Bell envisage l'existence d'états d'énergie liés à la surface des matériaux. Il élabore une nouvelle théorie quantique de ces états qui explique le comportement des semi-conducteurs.

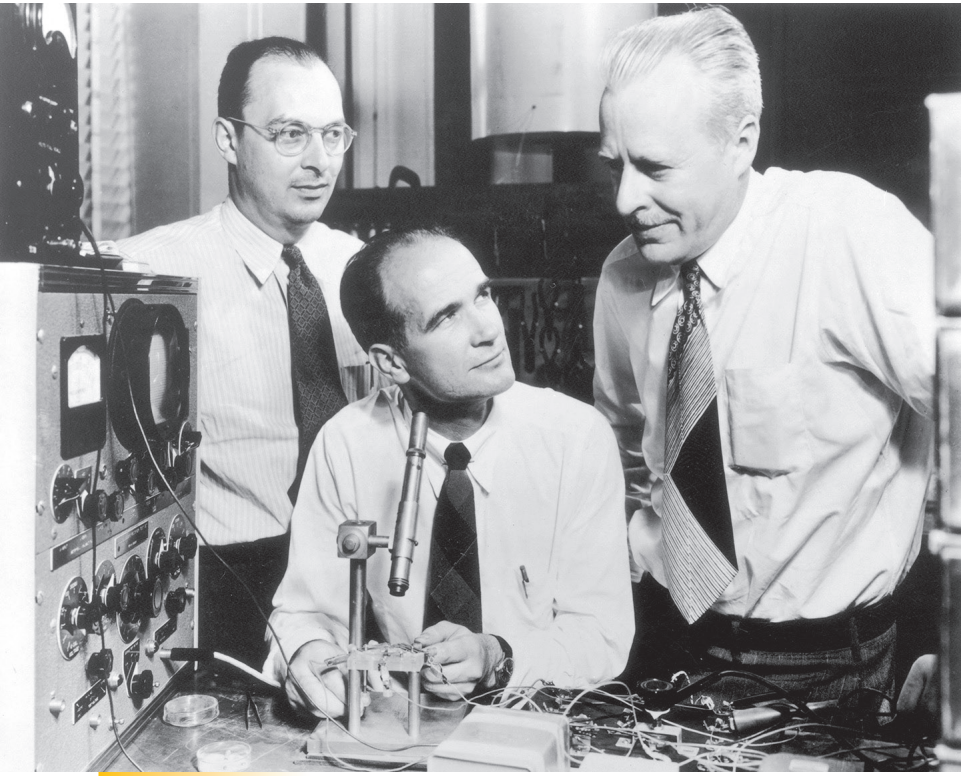
L'un de ses collègues, le physicien Walter Brattain (1902-1987), applique cette nouvelle approche à une combinaison de pointes métalliques, d'isolants et de semi-conducteurs, et crée ainsi le dispositif amplificateur tant attendu. Le 23 décembre 1947, devant toute l'équipe, les deux hommes amplifient un signal audio grâce au nouveau composant. On l'appelle « transistor ».

La famille transistor

Ce premier transistor dit « à pointe » est délicat à reproduire à l'identique. Quelques mois plus tard, toujours aux Bell Labs, William Schockley (1910-1989) conçoit le transistor bipolaire, qui remplace rapidement le transistor à pointe dans les postes radio, les calculateurs, etc.

Un autre type de transistor, dont le brevet a été déposé en 1930 par Julius Lilienfeld, arrive sur le devant de la scène dans les années 1950. Ce dernier, dit MOSFET, possède une structure simple, consomme peu d'énergie et peut être de taille très réduite. Dès lors, il prend place dans les circuits intégrés, qui sont en grande partie à l'origine de l'essor de l'informatique.





Un travail d'équipe

Le prix Nobel de physique est attribué à Bardeen, Shockley et Brattain, en 1956, pour la découverte du transistor. Toutefois, cette invention a bénéficié des idées et savoir-faire de nombreuses autres personnes. Citons le physicien expérimentateur G. Pearson, le chimiste R. Gibney, les métallurgistes J. H. Scaff et H. C. Theuerer pour la fabrication de silicium ultrapur et toute une équipe d'ingénieurs et de techniciens.

John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain aux laboratoires Bell, vers 1955.

Les transistors s'intègrent

Les transistors rencontrent un remarquable succès et sont utilisés dans tous les domaines alors que, dans les années 1950, la révolution technologique ne fait que commencer. En 1958, Jack Kilby assemble plusieurs transistors sur un même support hybride. L'année suivante, Robert Noyce reprend cette idée. En utilisant le nouveau procédé de fabrication *planar* de Jean Hoerni, inspiré de la photolithogravure, il envisage de connecter plusieurs composants sur une seule puce de silicium. Le premier circuit intégré est fabriqué en mai 1960. Dix ans plus tard, plus de 2 300 transistors sont concentrés sur une même puce baptisée *4004*. C'est le premier microprocesseur. Aujourd'hui, ces derniers intègrent plus d'un milliard de transistors et équipent ordinateurs, montres ou caméras numériques, satellites (▶ 1977) ou organes artificiels.

1949

La radioactivité dévoile l'âge des momies

Willard Libby
1908-1980

Après avoir participé au projet Manhattan, le chimiste américain Willard Libby intègre le nouvel Institut d'études nucléaires de Chicago, où il développe une méthode de datation par le carbone 14.

Le nucléaire active la recherche

Après la Seconde Guerre mondiale, la recherche nucléaire (▸ 1945, p. 300) a de nombreuses retombées scientifiques. Au sein de l'Institut d'études nucléaires, à Chicago, le prix Nobel de chimie Harold Urey (1893-1981) utilise des isotopes – atomes d'un même élément qui possèdent un nombre différent de neutrons – pour mieux comprendre l'histoire de la Terre et de l'Univers.

Son collègue Willard Libby reçoit de généreux financements des forces aériennes des États-Unis afin d'augmenter la précision d'appareils de mesure de la radioactivité, dont il est expert. À l'aide de ses nouveaux instruments, il peut alors détecter de très faibles concentrations d'un isotope radioactif du carbone, le carbone 14. Il a l'idée d'utiliser ces mesures pour dater des matériaux organiques d'origine végétale ou animale.

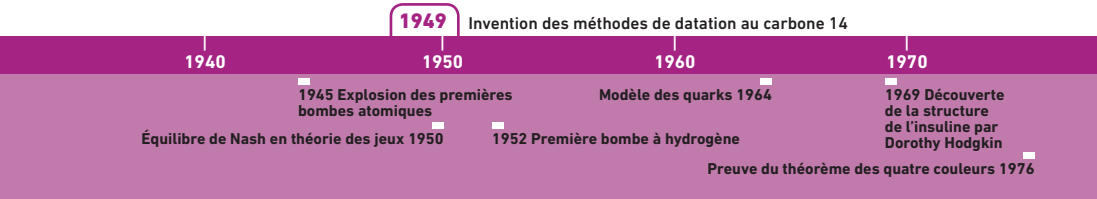
Sur la piste du carbone 14

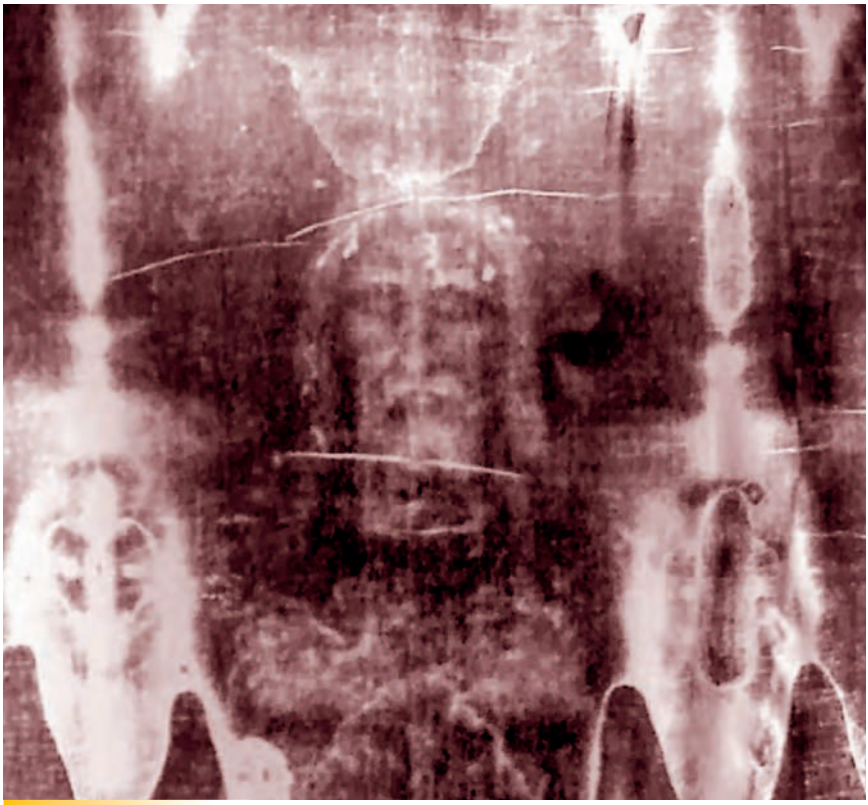
La méthode de datation de Libby se base sur le raisonnement suivant : sous le bombardement des rayons cosmiques, une partie des atomes d'azote présents dans l'atmosphère se transforme en carbone 14 radioactif. Ce carbone est alors absorbé par les plantes et intègre la biosphère.

Quand un organisme meurt, il cesse d'absorber du carbone 14 et sa proportion par rapport à celle du carbone 12 – l'isotope du carbone le plus commun – commence à diminuer de façon exponentielle. En conséquence, plus un matériel organique est vieux, moins il contient de carbone 14. On peut donc calculer son âge en mesurant son taux de radioactivité.

L'âge des pharaons

Les premières datations au carbone 14, faites à partir de fragments de bois retrouvés dans les tombes des pharaons Djoser, Snéfrou et Sésostris III et d'autres matériaux, sont publiées dans la revue *Science* en 1949. En 1960, Libby obtient le prix Nobel de chimie et, à partir des années 1970, l'usage de cette méthode de plus en plus précise va se répandre en archéologie et en géophysique.





L'authenticité du suaire de Turin mise en doute

La datation au carbone 14 appliquée à des objets de culte a parfois provoqué des polémiques. C'est le cas de la datation du suaire de Turin, réalisée en 1988 par les laboratoires de radiocarbone d'Arizona, Oxford et Zurich. Leurs résultats indiquent que le linge, prétendument utilisé pour ensevelir Jésus-Christ, a été tissé avec des fibres datant... du XIV^e^ siècle !

Du carbone au potassium

Avec la méthode du carbone 14, il est impossible de dater des matériaux vieux de plus de 50 000 ans. Toutefois, des méthodes utilisant d'autres éléments radioactifs ont été développées par les physiciens. La plus ancienne, celle du radium-plomb, inventée en 1907 par Ernest Rutherford (1871-1937) et Bertram Boltwood (1870-1927), permet la datation d'échantillons géologiques jusqu'à 2,5 milliards d'années. La méthode du potassium-argon, développée dans les années 1950, peut dater avec précision des roches de pratiquement tous les âges géologiques. C'est avec cette méthode que l'astromobile *Curiosity* a pu dater des roches martiennes en 2013.

1953

Les biologistes décryptent l'alphabet du vivant

Interprétant des images obtenues par la physico-chimiste Rosalind Franklin, le biologiste James Watson et le physicien Francis Crick décrivent la structure hélicoïdale de l'ADN, la molécule de l'hérédité.

La substance de l'hérédité

À la fin du XIXe siècle, le mécanisme qui permet la transmission de caractères de génération en génération n'est pas connu. En 1868, Charles Darwin (▸ 1859, p. 230) propose la théorie de la pangenèse, basé sur un mécanisme de transmission d'informations aux cellules de l'appareil reproducteur. En 1883, August Weismann (1834-1914) suppose qu'un « plasma germinatif » serait à l'origine de l'hérédité. Mais il faut attendre le perfectionnement des techniques biochimiques, au XXe siècle, pour connaître la base matérielle de l'hérédité.

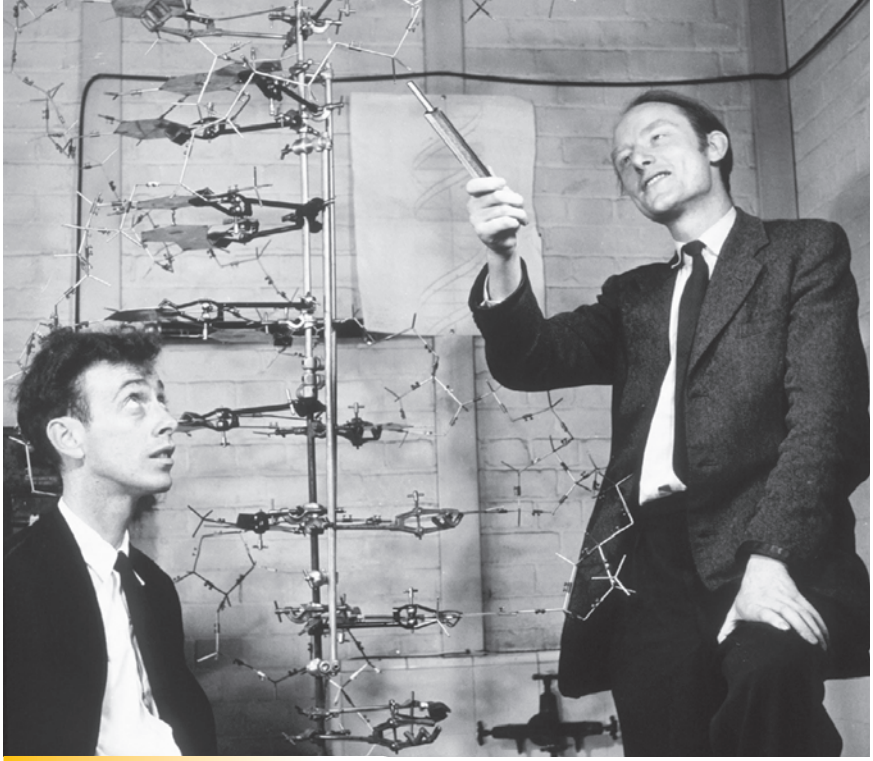
L'ADN sort de l'ombre

En 1928, cherchant à mettre au point un vaccin contre la grippe, Frederick Griffith (1879-1941) isole chez des bactéries ce qu'il appelle un « principe transformateur » capable de transmettre de l'information génétique. En 1944, Oswald Avery (1877-1955), Colin MacLeod (1909-1972) et Maclyn McCarty (1911-2005) montrent que ce principe est une molécule, l'acide désoxyribonucléique (ADN).

La relative simplicité chimique de cette molécule laisse perplexes les généticiens qui préfèrent penser que les protéines sont les principaux agents de l'hérédité. Ce n'est qu'en 1952 que le rôle central de l'ADN en tant que support de l'information génétique est démontré par Alfred Hershey (1908-1997) et Martha Chase (1927-2003), grâce à des expériences sur des bactériophages tracés par des éléments radioactifs (▸ 1949).

Une structure en double hélice

En 1952, la cristallographie X (▸ 1895, p. 256), autre technique issue de la physique, permet à Rosalind Franklin (1920-1958) d'obtenir des images qui suggèrent que la molécule d'ADN pourrait avoir une structure hélicoïdale. C'est à partir de ces clichés que Francis Crick (1916-2004) et James Watson (né en 1928) construisent un modèle de l'ADN et proposent un mécanisme de dédoublement de la molécule capable d'expliquer la copie et la transmission de l'information génétique.



Un code à décrypter

La molécule d'ADN a une structure en double hélice qui peut se dérouler en deux longues chaînes formées par quatre nucléotides différents : adénine (A), cytosine (C), guanine (G) ou thymine (T). L'arrangement de ces nucléotides constitue le code génétique, qui permet de fabriquer toutes les protéines d'un organisme vivant.

James Watson (à gauche) et Francis Crick (à droite) devant le modèle de l'ADN, 1953.

« Nous n'avons pu nous empêcher de remarquer que l'assemblage par paires spécifiques que nous postulons suggère immédiatement un mécanisme possible de copie du matériel génétique. »

Francis Crick et James Watson, article « A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid », 1953.

Le séquençage du génome humain

Lancé par le gouvernement des États-Unis en 1990, le projet international du « génome humain » se propose de déterminer l'ordre des 3,2 milliards de paires de nucléotides qui composent l'ADN humain. En 1998, la société privée Celera Genomics entre en concurrence avec ce projet afin de pouvoir breveter des fragments de gènes. Cette compétition ainsi que l'amélioration de la vitesse de calcul des ordinateurs permettent au consortium public de mener ce projet pharaonique à terme en 2003. Objet de convoitise pour l'industrie pharmaceutique et les assurances, la commercialisation des données génétiques soulèvent d'importantes questions éthiques.

1954

La pilule contraceptive est créée en toute discrétion

Margaret Sanger
1879-1966

L'alliance entre le militantisme féministe de Margaret Sanger et les avancées de la recherche biomédicale aboutit à la première pilule contraceptive, donnant les moyens aux femmes de contrôler leur fertilité.

Des corps sous contrôle

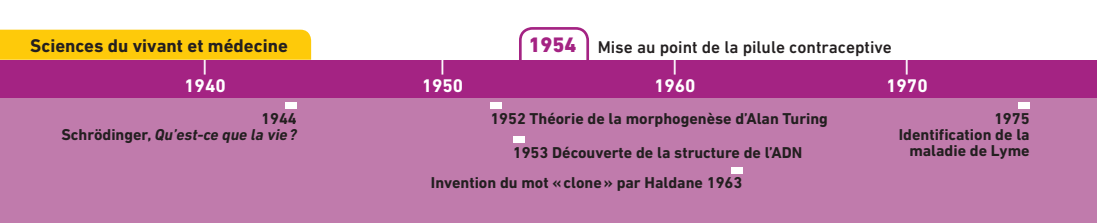
Dans la première moitié du XX^e siècle, des politiques natalistes et lois répressives condamnent l'avortement et la contraception. Aux États-Unis, la loi Comstock interdit la diffusion de toute information sur le contrôle des naissances. Devant cette situation, des groupes féministes s'organisent. Margaret Sanger, ancienne infirmière, rejoint la cause et use de son talent managérial pour trouver des financements.

La suffragette et riche philanthrope Katharine McCormick (1875-1967), ralliée à son combat par Sanger, finance les recherches de l'équipe américaine du docteur Gregory Pincus (1903-1967) à la Fondation Worcester pour la biologie expérimentale. Dès 1953, grâce à plus de deux millions de dollars, les chercheurs mettent au point les premières versions d'une pilule contraceptive à base de progestérone, non seulement très efficace, mais aussi discrète et administrable par voie orale.

Une nouvelle liberté

L'hormone utilisée dans cette première pilule n'est cependant pas très active par voie orale. Il faut donc trouver un principe actif plus efficace. Or, justement, les chimistes Luis Miramontes (1925-2004), Carl Djerassi (1923-2015) et Jorge Rosenkranz (né en 1916), du laboratoire Syntex au Mexique, viennent de synthétiser la noréthistérone. Ce composé deviendra le principal composant actif de la première pilule contraceptive, baptisée Enovid.

L'efficacité de cette pilule est démontrée en 1954 lors d'essais cliniques à large échelle, à Porto Rico et Haïti, où la contraception n'est pas illégale. C'est d'abord comme médicament servant à réguler les menstruations que la pilule est approuvée et commercialisée en 1957. Son succès massif et les mobilisations sociales aideront ensuite à légaliser son usage comme contraceptif dans de nombreux pays, comme aux États-Unis en 1960 ou en France en 1967. Dès lors, la pilule donne aux femmes une nouvelle liberté et le pouvoir de prendre une plus grande place dans le monde du travail.



Un médicament très répandu

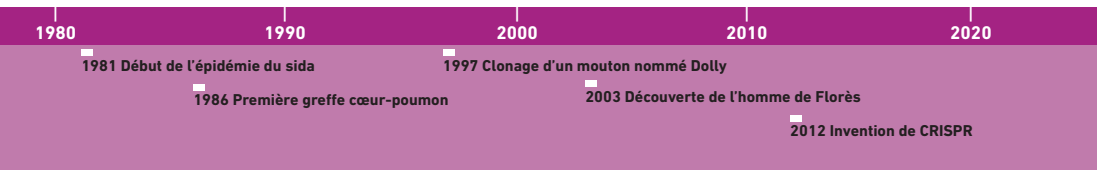
La pilule contraceptive rencontre un large succès commercial. En 1965, cinq ans après sa mise sur le marché, elle est utilisée par 25 % des femmes aux États-Unis. Malgré des résistances religieuses et idéologiques, de nouvelles formules sont essayées, dont la pilule RU486, qui évite l'implantation de l'embryon dans l'utérus et ainsi le recours à l'avortement par des moyens mécaniques.

« Aucune femme ne peut se déclarer libre si elle ne possède pas le contrôle de son corps. Aucune femme ne peut se déclarer libre jusqu'à ce qu'elle puisse choisir consciemment si elle sera ou non une mère. »

Margaret Sanger, « A Parents' Problem or Woman's ? », 1919.

Une affaire d'hormones

Les hormones sont décrites par le physiologiste britannique Ernest H. Starling (1866-1927) en 1905. Dès lors, la recherche se développe : on reconnaît l'importance des hormones pour la régulation de la croissance ou celle du taux de glucides dans le sang, et on commence à les utiliser pour traiter l'arthrite et le diabète. Dans les années 1930, des travaux ayant pour objectif d'améliorer la fertilité ou de réguler les menstruations permettent d'identifier plusieurs hormones impliquées dans le contrôle du cycle reproductif comme l'estriol, l'estrone et la progestérone.



1956

Les conteneurs bouleversent les transports

Malcolm McLean
1913-2001

Un entrepreneur américain révolutionne le fret maritime en proposant un système de conditionnement des marchandises par conteneurs. En une quinzaine d'années, le commerce international s'en trouve transformé.

Un camionneur entreprenant

En 1934, Malcolm McLean, un camionneur originaire de Caroline du Nord, crée une entreprise de fret routier spécialisée dans le transport de marchandises entre le Nord et le Sud des États-Unis. L'entreprise prospère et, en 1954, possède plus de six cents camions. Mais McLean s'inquiète de l'immobilisation de plus en plus fréquente de ses camions dans les bouchons sur les autoroutes, et de la concurrence des entreprises de fret maritime qui peuvent faire du cabotage entre les ports de la côte Est.

Révolution du fret maritime

Cette constatation l'amène à vendre sa société et à se lancer dans le développement de nouvelles techniques de fret maritime. Jusque-là, les marchandises étaient transportées en vrac ou par palettes sur les bateaux. L'idée révolutionnaire de McLean est de mettre ces marchandises dans des conteneurs – des caissons métalliques de onze mètres de long – et d'arrimer ces caissons sur le pont des navires. Cela permet de réduire les coûts de main-d'œuvre, d'accélérer le chargement et le déchargement des bateaux, et ainsi de mieux rentabiliser les investissements des armateurs dans les matériels.

Le désengorgement des ports du Vietnam

Utilisant ces nouvelles techniques (conteneurs, porte-conteneurs, grues spéciales, etc.), McLean vend des services de fret maritime entre le Texas et le New Jersey à partir de 1956. Mais c'est la guerre du Vietnam qui lui permet de s'imposer dans cette industrie. L'armée américaine rencontre alors un problème logistique majeur : les ports vietnamiens sont tellement engorgés que les navires doivent attendre en rade pendant plusieurs semaines avant de pouvoir décharger armes et ravitaillement.

L'introduction du système de McLean en 1967 va résoudre rapidement ces problèmes de logistique. Son succès est tel qu'il force ses concurrents à faire des investissements colossaux dans la conteneurisation de leurs flottes à la fin des années 1960.

L'*Ideal-X*, premier porte-conteneurs

L'*Ideal-X*, un ancien tanker transformé en porte-conteneurs par McLean, peut transporter jusqu'à 58 conteneurs. À la fin des années 1950, il est affecté au transport des marchandises entre les ports du Nord et du Sud des États-Unis.

Les techniques de la mondialisation

Les porte-conteneurs comptent, avec les jumbo-jets (gros porteurs), le fax et l'Internet (► 1969, p. 326), parmi les technologies qui ont rendu possible la mondialisation. À partir des années 1970, les échanges commerciaux et la circulation des hommes et des capitaux dans le monde s'accroissent énormément. Alors que fax et, plus tard, Internet rendent le transfert d'informations et de documents beaucoup plus aisé, les porte-conteneurs permettent de transporter des marchandises en quantités gigantesques à très bas coûts. Aujourd'hui, 90 % des échanges commerciaux se font par voies maritimes, et le commerce mondial repose sur l'utilisation de plusieurs dizaines de millions de conteneurs.

1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020

1986 Accident nucléaire à la centrale de Tchernobyl

Ouverture du tunnel sous la Manche 1994

2001 Lancement de l'encyclopédie Wikipédia

2016 Victoire du programme AlphaGo contre un joueur de go professionnel

1957

L'année géophysique internationale lance la conquête de l'espace

Sergueï Korolev (1906-1966)

En pleine guerre froide, l'année géophysique impulse une surveillance globale de l'environnement terrestre et fait de l'Antarctique un domaine réservé à la science. Elle donne aussi le coup d'envoi de la course spatiale.

Fusées et espions

En pleine guerre froide, dans la droite lignée de l'année polaire, le Conseil international des unions scientifiques lance l'année géophysique internationale, qui se déroule entre 1957 et 1958. Son but est de coordonner les observations de divers phénomènes géophysiques, des aurores boréales au monde sous-marin. L'exploration de l'Antarctique est aussi un projet prioritaire.

Pour l'Union soviétique et les États-Unis, qui développent en secret des missiles chargés de lancer des satellites espions, cet événement fournit l'occasion parfaite de déployer leurs technologies et de survoler discrètement l'espace aérien de l'ennemi.

Spoutnik prend son envol

En 1955, les États-Unis annoncent qu'ils profiteront de l'événement pour mettre en orbite leurs premiers satellites. L'URSS affirme également sa volonté de participer à la conquête spatiale, mais ses capacités techniques sont méprisées par les Nord-Américains.

C'est donc par surprise, le 4 octobre 1957, que les stations de radio du monde entier captent le signal de Spoutnik 1. Ayant développé le premier satellite artificiel de l'histoire en un temps record, l'équipe de l'ingénieur soviétique Sergueï Korolev coiffe les États-Unis au poteau. Et un mois plus tard, à l'occasion du 40e anniversaire de la révolution russe, un deuxième satellite met en orbite une chienne appelée Laïka.

Le début de la course spatiale

L'échec du premier satellite américain Vanguard, qui explose au sol en décembre 1957, décide les États-Unis à remanier leur politique scientifique. En 1958, ils mettent en place l'Advanced Research Projects Agency, chargée de coordonner des projets technoscientifiques stratégiques, comme la défense antimissile, la détection des essais nucléaires, la science des matériaux et les technologies de l'information (▸ 1969, p. 326). La même année, la National Aeronautics and Space Administration (NASA), est créée et se voit doter d'un ambitieux programme de lancements (▸ 1969, p. 328).

Les satellites artificiels

Initialement utilisés à des fins d'espionnage et de recherches scientifiques, les satellites artificiels servent aux télécommunications à partir de 1965, année du lancement d'Intelsat 1. En 1978, avec la première constellation de satellites Block 1, les forces aériennes des États-Unis mettent en place la base d'un système de géolocalisation, le GPS, qui permet de se localiser avec une précision de quelques centimètres.

Poster soviétique sur le lancement du Spoutnik, 1957.

La coopération internationale sonde la planète

En même temps qu'elle ouvre une fenêtre sur l'espace, l'année géophysique internationale est cruciale pour l'étude de notre propre planète. La coopération de plus de 8 000 savants de soixante pays conduit à de grandes découvertes : les dorsales médio-océaniques, qui confirmeront la tectonique de plaques (▶ 1968), les ceintures de radiation de Van Allen, qui protègent la Terre des rayons cosmiques, l'explication des aurores boréales par la radiation solaire, etc. À Hawaï, à partir de 1958, Charles Keeling (1928-2005) commence à mesurer systématiquement la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (▶ 1990). Parallèlement, les données récoltées par les bases scientifiques installées en Antarctique et les satellites radars servent de référence au traité sur l'Antarctique de 1959, qui démilitarise le continent et le transforme en une immense station scientifique.

1958

Georges Mathé sauve des physiciens irradiés

Georges Mathé
1922-2010

En sauvant par transfusion de moelle osseuse quatre physiciens irradiés accidentellement, Georges Mathé ouvre la voie aux greffes dites allogéniques et montre que la guérison de la leucémie est possible. Il s'impose comme un pionnier de la cancérologie moderne.

Six personnes mortellement irradiées

Le 15 octobre 1958 à Vinca, en ex-Yougoslavie, un réacteur nucléaire s'emballe (▸ 1986). Six physiciens, gravement irradiés, sont dirigés sans délai vers la Fondation Curie à Paris. Chez cinq d'entre eux, les cellules sanguines ont totalement été détruites par les doses de radiation. L'issue semble fatale.

Les cancérologues Henri Jammet et Georges Mathé décident de leur faire une transfusion de moelles osseuses issues de donneurs non apparentés, susceptibles d'assurer le renouvellement des cellules sanguines. Le malade le plus irradié meurt au 32e jour. Les autres récupèrent peu à peu et reprennent une vie normale.

Une réponse pour la leucémie

Le drame de Vinca montre à Mathé que la greffe de moelle osseuse qu'il pratique avec un certain succès sur des souris de laboratoire, et atteintes de leucémie et irradiées, est également efficace chez l'homme. Comme pour les souris, certaines cellules « étrangères » greffées chez les physiciens ont pris le relais des cellules détruites par l'irradiation. Reste à comprendre la réaction du greffon contre l'hôte exposant tout receveur au risque d'être attaqué par les cellules de donneurs non apparentés. La découverte du système d'histocompatibilité par Jean Dausset (1916-2009) en 1958 apporte la réponse et permet de minimiser dès lors cette réaction.

Le premier leucémique guéri

En 1963, pour sauver un jeune leucémique, Mathé propose de réaliser une greffe de moelle osseuse. Une fois toutes les cellules de moelle malades détruites par irradiation, le patient est transfusé avec les moelles saines de donneurs de sa famille. La réaction du greffon contre l'hôte passée, les examens de sang montrent que les cellules de l'un des donneurs se sont installées dans la moelle et produisent des lignées sanguines saines. La greffe a pris. Mathé réalise ainsi la première greffe de moelle osseuse dite allogénique, entre deux individus génétiquement différents. Il est le premier à soigner une leucémie aiguë.

Un esprit visionnaire

Georges Mathé prend très tôt conscience de la nécessité du travail collaboratif pour vaincre le cancer. Ainsi, dans les années 1960, il est à l'origine de l'Organisation européenne de recherche du traitement du cancer et suggère la création de l'INSERM. Par ailleurs, l'Institut de cancérologie et d'immunogénétique, qu'il crée en 1961, inaugure l'idée d'une médecine globale, associant laboratoires, animalerie et première unité de soins disposant d'un secteur hospitalier stérile.

Georges Mathé observant une cellule sanguine vue au microscope, 1975.

« Lors de mes études [...] j'ai assisté à quelque chose qui m'a épouvanté : la résignation. [...] Il y avait des enfants atteints de leucémie. On les regardait mourir. Homme d'action par définition, j'ai décidé de prendre pour cible cette maladie. »

Georges Mathé, dans l'émission *L'homme en question*, 1977.

Les clés de l'immunité

En 1958, Jean Dausset met en évidence un système de reconnaissance du soi qui permet au système immunitaire d'identifier les cellules étrangères et de les éliminer. Il s'agit du système d'histocompatibilité ou système HLA. La compréhension de ce mécanisme immunitaire rend alors possible la réussite des greffes par sélection d'un donneur ayant le système HLA le plus proche possible de celui du receveur. On minimise ainsi la réaction du greffon contre l'hôte et on rend possible le « chimérisme », autrement dit la cohabitation de deux populations cellulaires génétiquement différentes au sein d'un même organisme.

1959

Un crâne et quelques traces de pas changent l'histoire de l'humanité

Louis Leakey
1903-1972
Mary Leakey
1913-1996

À travers leurs découvertes sur les australopithèques, les anthropologues britanniques Louis et Mary Leakey révolutionnent leur domaine et font de l'Afrique le berceau de l'humanité.

Le « chaînon manquant »

En 1871, Darwin publie *La Filiation de l'homme*, un ouvrage qui annonce la parenté biologique entre les humains et le reste des primates. Dès lors, la recherche d'un supposé « chaînon manquant » mobilise les anthropologues. Le néerlandais Eugène Dubois (1858-1940) pense l'avoir trouvé en Asie. Son « homme de Java » ou pithécanthrope, décrit en 1894, est pendant longtemps considéré comme l'ancêtre des humains. Mais au milieu du XX^e^ siècle, après plus de vingt ans de recherches, le couple d'anthropologues Louis et Mary Leakey fait une formidable découverte.

Notre ancêtre Casse-noisettes

En 1959, Mary Leakey découvre, dans les gorges d'Olduvai, en Tanzanie, le crâne fossile d'un australopithèque robuste, surnommé « Casse-noisettes » en raison de sa puissante denture. Sa description bouleverse alors, à bien des égards, les méthodes d'analyse en paléontologie.

À la demande de Louis Leakey, le crâne est en effet daté pour la première fois grâce au concours de physiciens. La mesure de la désintégration du potassium radioactif (▸ 1949) permet de lui attribuer un âge d'environ 1,75 million d'années et révèle que la lignée des hominidés est bien plus ancienne qu'on le pensait.

La ruée vers l'os

Les Leakey montrent que les australopithèques possèdent des caractéristiques jusque-là réservées au genre *Homo*, telles que la bipédie. En 1978, l'équipe de Mary met au jour une série d'empreintes fossilisées datant d'environ 3,5 millions d'années, où le talon enfoncé prouve que les individus marchaient debout.

La découverte de ces premiers hominidés déclenche, selon Yves Coppens, « une ruée vers l'os comme il n'en avait jamais existé ». Dès lors, les fouilles se multiplient dans la région, dévoilant des spécimens toujours plus âgés comme la désormais célèbre Lucy, et précisant l'histoire de l'humanité.

Sciences du vivant et médecine

1940 1950 1960 1970

1959 Découverte de fossiles d'australopithèques

1944 Schrödinger, *Qu'est-ce que la vie ?*

1952 Théorie de la morphogenèse d'Alan Turing

1953 Découverte de la structure de l'ADN

Invention du mot « clone » par Haldane 1963

1975 Identification de la maladie de Lyme

Lucy in the sky with diamonds

Découvert en 1974 par une équipe franco-américaine, le squelette de Lucy – devenu aussi célèbre que la chanson des Beatles d'où elle tire son nom – est une femelle d'*Australopithecus afarensis* d'un peu plus d'un mètre de haut. La forme du bassin et l'articulation du fémur montrent sans ambiguïté qu'elle se déplaçait dressée sur ses membres postérieurs. Le squelette fossile de cet hominidé, daté d'environ 3 millions d'années, est actuellement conservé au Musée national d'Éthiopie, à Addis-Abeba.

Reconstitution de Lucy.

La vallée des merveilles

La vallée du Grand Rift traverse, sur des milliers de kilomètres, l'Afrique orientale. Sa richesse en sédiments, que les grands lacs qui la bordaient ont déposés au cours des vingt derniers millions d'années, en font un piège idéal pour les fossiles. C'est pour cette raison que les époux Leakey font de cette vallée leur principal terrain d'étude. Ils y découvrent les restes fossiles d'une espèce du genre *Homo* disparue il y a environ 1,5 million d'années : l'*Homo habilis*. Après eux, leur fils Richard découvre, en 1971, l'*Homo ergaster*. Plus au nord, en Éthiopie, l'Américain Donald Johanson (1943) et les Français Yves Coppens (1934) et Maurice Taieb (1935) découvrent les restes de Lucy. Cette profusion de restes d'hominidés fait penser à une origine africaine de l'humanité.

1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020

1981 Début de l'épidémie du sida

1986 Première greffe cœur-poumon

1997 Clonage d'un mouton nommé Dolly

2003 Découverte de l'homme de Florès

2012 Invention de CRISPR

1962

Rachel Carson annonce un printemps silencieux

Rachel Carson
1907-1964

Dans un livre à succès, la biologiste et vulgarisatrice Rachel Carson dénonce les effets des pesticides sur l'environnement et met en garde contre les dangers de ces produits sur la santé humaine.

La guerre aux insectes est déclarée

L'essor de l'agriculture intensive à la fin du XIXe siècle est associé au développement et à l'utilisation massive de pesticides. Dans les années 1930, profitant des recherches menées sur les armes chimiques pendant la Grande Guerre (▸ 1909, 1915) et des avancées en chimie de synthèse (▸ 1856), un grand nombre de nouvelles substances sont mises sur le marché.

Le dichlorodiphényltrichloréthane (DDT), utilisé pendant la Seconde Guerre mondiale, se relève particulièrement efficace en tant qu'insecticide. À la fin du conflit, il est largement utilisé pour tenter d'éradiquer le moustique, vecteur du paludisme (▸ 1972), et lutter contre les espèces d'insectes nuisibles.

Une biologiste fait entendre sa voix

Toutefois, dès le début des années 1950, des scientifiques constatent que le DDT a aussi des conséquences néfastes sur la santé humaine et sur l'environnement. Ces résultats attirent l'attention de la biologiste américaine Rachel Carson, déjà célèbre pour ses ouvrages de vulgarisation sur la mer.

Elle commence par écrire un article sur les dégâts occasionnés par le DDT. Mais les éditeurs le refusent, par peur de perdre les revenus publicitaires de l'industrie chimique. Elle décide alors de consacrer quatre années de sa vie à faire un état des lieux de la recherche sur cette question. C'est en 1962, sous le titre de *Printemps silencieux*, que le résultat de ce travail voit le jour et lance la controverse.

Des effets à long terme

Attaquée par l'industrie chimique, Carson se défend, soulignant l'abondance de preuves scientifiques qui démontrent les effets nocifs du DDT. Malgré son décès précoce, la force de sa critique conduit à la création de l'Agence américaine de protection de l'environnement en 1970, qui interdit le DDT aux États-Unis en 1972. En 2001, la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants régule son usage au niveau mondial, permettant toutefois son usage dans la lutte contre le paludisme.

Le DDT est partout

Dans les années 1940, des pesticides comme le DDT accompagnent massivement l'expansion de l'agriculture intensive. Ce modèle, qui utilise des variétés végétales très productives sur de grandes étendues en monoculture, se répand depuis le début du XXe siècle. Il allie production agricole et recherche en chimie et biotechnologie, transformant les compagnies chimiques en acteurs incontournables de la production alimentaire.

Affiche publicitaire américaine qui indique « *Tirez pour tuer – Protégez votre potager pour la défense* » et fait la promotion d'un pulvérisateur de DDT, 1943-1945.

« La contamination de notre monde n'est pas seulement une affaire de pulvérisation massive. Les innombrables petites expositions, quotidiennes et permanentes, peuvent s'avérer plus dangereuses encore. [...], ces contacts continuels avec de dangereux produits chimiques, de la naissance à la mort, peuvent se révéler désastreux. »

Rachel Carson, *Printemps silencieux*, 1962.

Le chant des oiseaux

Le titre du livre de Rachel Carson, le *Printemps silencieux*, fait référence au sort des oiseaux dont nous finirons par regretter le chant printanier. Se nourrissant d'insectes contaminés aux pesticides, les oiseaux accumulent les produits toxiques dans leur corps et meurent. Carson souligne que la nature est incapable de s'adapter au rythme effréné des nouvelles découvertes en chimie : « dans le monde moderne, il n'y a pas de temps ». Il s'agit d'un problème scientifique et politique. La vérification de l'innocuité des produits ne peut pas suivre le rythme de l'innovation, et elle est souvent effectuée par les acteurs également en charge de promouvoir l'agriculture industrielle, soulevant un conflit d'intérêts manifeste.

1963

Edward Lorenz découvre le chaos dans les ailes d'un papillon

Edward Lorenz
1917-2008

En voulant montrer que même les systèmes mathématiques les plus simples peuvent avoir des comportements compliqués, le météorologue Edward Lorenz lance la mode du chaos déterministe.

Le temps qu'il fait

Dès l'apparition de l'ordinateur digital, John von Neumann (▸ 1945, p. 298) a l'idée d'appliquer sa puissance de calcul à la prévision météorologique. Pendant les années 1950, à Princeton, des météorologues comme Jule Charney (1917-1981) développent des modèles numériques qui permettent de prévoir le temps qu'il va faire, un ou deux jours à l'avance.

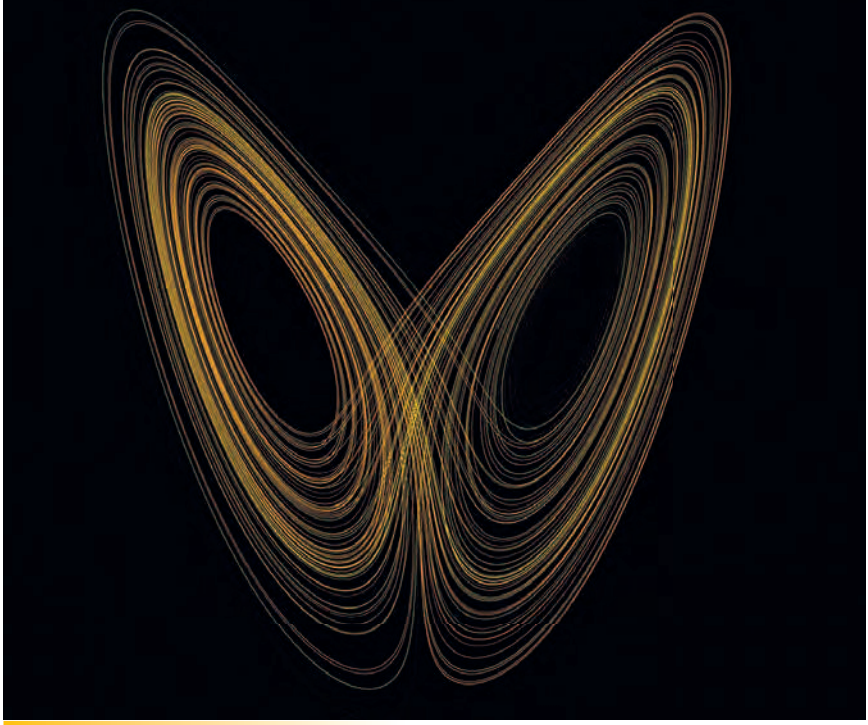
Se désintéressant de l'aspect technique de la question, Charney cherche à développer les concepts permettant de faire des prévisions à plus long terme. En 1956, il accepte un poste au Massachusetts Institute of Technology (MIT), près de Boston, où il commence à travailler avec son collègue Edward Lorenz.

Pur hasard

Lorenz est plus sceptique que Charney quant à la possibilité d'étendre les méthodes de simulations numériques développées aux prévisions à très long terme. Cet objectif lui semble illusoire. Pour montrer que même les modèles les plus simples peuvent être imprévisibles, autrement dit qu'il y a des limites intrinsèques à la possibilité de prévision, Lorenz simplifie drastiquement le modèle de la circulation atmosphérique jusqu'à obtenir, en 1963, un système qui ne comprend plus que trois paramètres. Bien peu réaliste, ce modèle concentre cependant l'essence de sa démonstration : il produit un résultat que rien ne peut distinguer du pur hasard.

La théorie du chaos

Dans les deux décennies qui suivent, un grand nombre de chercheurs s'enthousiasment alors pour ce qu'ils appellent la théorie du « chaos déterministe ». De nombreux autres modèles simples ont des comportements chaotiques ou sensibles aux conditions initiales, ce qui ne les empêche pas d'exhiber un ordre caché d'une très grande beauté, comme celui révélé par l'attracteur de Lorenz. Au moment où l'informatique commence à se démocratiser, ces recherches approfondissent la compréhension de la modélisation numérique, mais aussi celle de ses limites.



L'attracteur et l'effet papillon

En traçant dans l'espace les valeurs des paramètres du système de Lorenz, on obtient un « attracteur » qui fait penser aux ailes d'un papillon. En 1972, Lorenz utilise à nouveau cette métaphore : pour prédire une tornade au Texas un mois à l'avance, il faut parfois considérer des événements aussi infimes que les battements d'ailes d'un papillon au Brésil.

Attracteur de Lorenz.

« Il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux [...]. La prédiction devient impossible. »

Henri Poincaré, *Science et méthode*, 1908.

Sensibilité aux conditions initiales

Le pouvoir prédictif de la science classique frappe les imaginations, au point que Pierre-Simon Laplace (▶ 1814) postule qu'il est en principe possible de tout savoir tant du passé que du futur. À la fin du XIXe siècle, Henri Poincaré (1854-1912) entrevoit pourtant que cette situation idéale est en réalité inatteignable. Dans certains cas, les équations du mouvement sont sensibles aux conditions initiales, c'est-à-dire qu'une petite incertitude dans la mesure produit une incertitude totale au bout de peu de temps. Poincaré en déduit qu'il est impossible de prouver la stabilité du Système solaire. Sur une échelle de plusieurs centaines de milliers d'années, les orbites des planètes peuvent avoir une évolution chaotique, ce qui autorise la possibilité de collisions planétaires. En 1971, le physicien David Ruelle (né en 1935) et le mathématicien Floris Takens (1940-2010) suggèrent que l'émergence de la turbulence dans les écoulements de fluides pourrait s'expliquer de la même façon.

1966

Lynn Margulis fait rimer évolution avec coopération

Lynn Margulis
1938-2011

La microbiologiste américaine Lynn Margulis démontre que la cellule eucaryote, constitutive des plantes et des animaux, est apparue grâce à la symbiose entre différents organismes unicellulaires. Pour elle, la coopération est un moteur essentiel de l'évolution.

Le néodarwinisme remis en cause

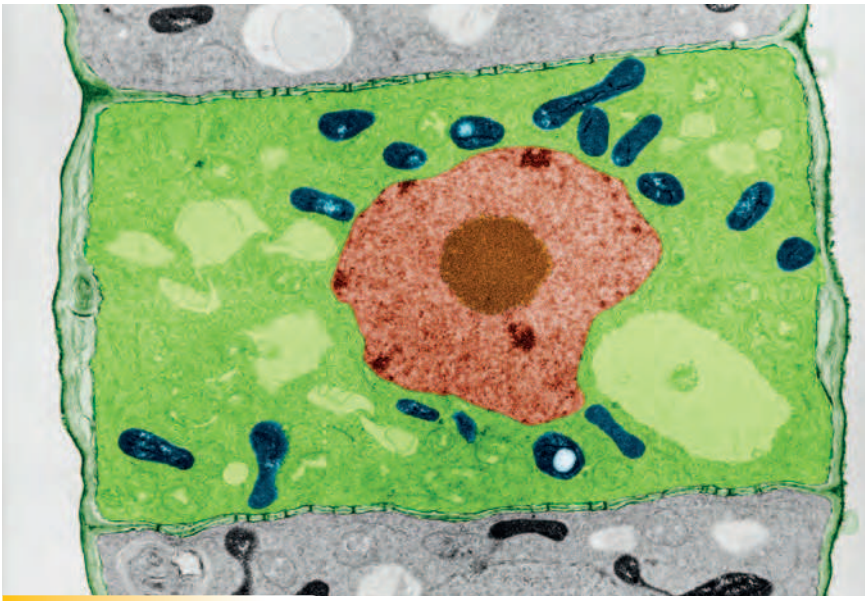
Vers la fin des années 1960, la théorie néodarwinienne de l'évolution s'impose pour expliquer la diversité du vivant (▸ 1859, p. 230 et dossier, p. 288-289). Dans ce cadre conceptuel, les principaux moteurs de l'évolution sont la compétition entre individus et la sélection naturelle de mutations génétiques avantageuses, apparues de manière aléatoire.

En 1966, Lynn Margulis, alors membre de l'université de Boston, remet en cause cette théorie dominante. Dans une publication révolutionnaire, elle avance que la symbiose est aussi un moteur important de l'évolution et que l'apparition des cellules eucaryotes – dotées d'un noyau et caractéristiques des organismes pluricellulaires – est le résultat évolutif d'une coopération entre organismes unicellulaires distincts.

Une nouvelle vision de l'évolution

D'abord rejeté par de nombreux journaux scientifiques, l'article est finalement accepté par le *Journal of Theoretical Biology* en mars 1967. Margulis fonde son hypothèse sur l'organisation chimique particulière qu'elle a observée dans les membranes des mitochondries et des chloroplastes, structures en charge de la production d'énergie au sein de la cellule eucaryote. Elle montre que ces organites cellulaires sont en réalité d'anciennes bactéries intégrées dans une cellule hôte. Ainsi, une interaction durable entre différentes espèces aurait permis, par une lente évolution, l'émergence d'un nouveau type cellulaire : les cellules eucaryotes.

Margulis montre donc comment, en complément de la sélection naturelle, la coopération entre organismes constitue un moteur de l'évolution auquel on doit l'émergence des plantes et des animaux. Malgré l'opposition à laquelle elle doit faire face, sa théorie « endosymbiotique » est confortée dans les années 1980, lorsqu'on démontre que les mitochondries et les chloroplastes possèdent leur propre ADN, distinct de celui de la cellule hôte. Elle est largement acceptée aujourd'hui par la communauté scientifique.



L'organisation du vivant

Tous les êtres vivants sont formés du même élément de base, la cellule. On les divise en trois groupes principaux : les eucaryotes, dont les cellules possèdent un noyau, et les eubactéries et les archées, dont les cellules sont dépourvues de noyau. Avec sa théorie, Margulis ne propose rien de moins que de nouvelles relations de parenté entre les trois grands groupes du vivant, à la base de l'arbre de la vie, et dont les liens sont vieux d'au moins un milliard d'années !

Cellule de racine d'oignon vue au microscope électronique, où l'on distingue le noyau (en marron), les mitochondries (en bleu) et les parois cellulaires (en vert).

Une symbiose à l'échelle planétaire

Lynn Margulis est coauteure, avec le chimiste James Lovelock (né en 1919), de l'hypothèse Gaïa. Selon cette théorie, la Terre peut être assimilée à un super-organisme capable d'autorégulation. Ainsi, les conditions nécessaires à l'épanouissement de la vie sont maintenues grâce à des interactions écologiques, en grande partie symbiotiques, entre l'environnement et le vivant. La composition de l'atmosphère ou la salinité des océans sont par exemple la conséquence de l'activité coordonnée de milliards d'organismes, et notamment des bactéries, qui peuplent notre planète. Et, en retour, cette composition permet à ces organismes de vivre.

« L'incorporation et l'intégration de génomes étrangers, bactériens et autres, entraîne une importante et utile variabilité héritable. L'acquisition de génomes a été primordiale lors du processus évolutif tout au long de l'histoire sinueuse de la vie. »

L. Margulis et D. Sagan, *Acquiring Genomes : A Theory of the Origins of Species*, 2002.

1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020

1981 Début de l'épidémie du sida

1986 Première greffe cœur-poumon

1997 Clonage d'un mouton nommé Dolly

2003 Découverte de l'homme de Florès

2012 Invention de CRISPR

1968

La tectonique des plaques fait dériver les continents

Entre 1967 et 1968, plusieurs géophysiciens proposent une nouvelle vision de la structure interne de la Terre et de son évolution. La mobilité des continents expliquerait l'existence des chaînes de montagnes, des séismes et des volcans.

Des continents mobiles

Au début du XX^e^ siècle, on pense que la surface de la Terre est fixe, qu'elle peut se rétracter en se ridant mais ne se déplace pas horizontalement. Or il se trouve que le météorologiste Alfred Wegener (1880-1930) accumule de nombreux indices qui contredisent cette conception. Il propose en 1912 l'hypothèse de continents mobiles réunis par le passé en un seul continent : la Pangée.

Ses opposants sont nombreux et parfois virulents. Mais Wegener séduit malgré tout quelques géologues comme Arthur Holmes (1890-1965), qui explique que des mouvements de convection internes, en évacuant la chaleur du globe terrestre, pourraient provoquer la dérive des continents.

Comme sur un tapis roulant

Après la Seconde Guerre mondiale, le développement de l'océanographie permet de découvrir, au fond des océans, des chaînes de montagnes appelées dorsales et des fosses abyssales (▸ 1957). Le géologue américain Harry H. Hess (1906-1969) avance alors l'idée que la croûte océanique se forme au niveau des dorsales, ces dernières induisant, sous l'effet des mouvements de convection sous-jacents, l'écartement des fonds marins. Ainsi, les continents, entraînés par les fonds marins, dériveraient passivement comme sur un tapis roulant.

La tectonique des plaques

Plusieurs géophysiciens proposent, en 1968, une nouvelle théorie où apparaît le terme de « plaque », chacune désignant une portion de la surface terrestre se déplaçant comme un radeau sur le manteau terrestre. Xavier Le Pichon (né en 1937) propose un modèle composé de six plaques dont les mouvements des deux cents derniers millions d'années permettent de reconstruire le supercontinent de la Pangée proposé par Wegener. La théorie s'appelle la tectonique des plaques. Elle explique, par collision de plaques, la formation de chaînes de montagnes comme les Alpes, les arcs volcaniques et les zones à forte sismicité.

Des dorsales océaniques très actives

Dans le fond des océans s'érigent de puissantes chaînes de montagnes, les dorsales océaniques. C'est en mesurant des anomalies magnétiques de part et d'autre de ces axes montagneux, en 1963 puis en 1966, que les scientifiques obtiennent la preuve que la croûte océanique se crée au niveau de ces dorsales et écarte les terrains.

Écartement des plaques Eurasie-Amérique du Nord de part et d'autre de la dorsale médio-atlantique, qui émerge ici en Islande.

« Si nous acceptons l'hypothèse de Wegener, il nous faut faire table rase de tout ce que nous avons appris depuis soixante-dix ans. »

R. T. Chamberlain, *Some of the objection to Wegener's Theory*, 1928.

Sans explication, point de salut

L'hypothèse de mobilité de Wegener repose sur des indices de différentes natures. Il constate la ressemblance de profils côtiers de part et d'autre de l'Atlantique. Il s'appuie également sur la similitude, entre blocs continentaux aujourd'hui séparés, de flore et de faune tant fossiles qu'actuelles mais aussi de profils stratigraphiques de chaînes de montagnes. Comme ces arguments ne convainquent pas, il cherche une explication dans un glissement des continents vers l'équateur ou dans les forces de frottements des marées. Cela ne satisfait pas la communauté des géologues qui rejette son hypothèse de mobilité.

1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020

1985 Découverte du trou dans la couche d'ozone

1990 Premier rapport du GIEC sur le réchauffement global

2003 Désintégration de la navette *Columbia* en vol

2012 Image du fond diffus cosmologique par le satellite Planck

Première image d'un trou noir 2019

1969

Les militaires américains créent ARPANET

Le ministère de la Défense décide de construire un réseau qui connecte entre eux des ordinateurs installés dans différentes régions des États-Unis. Ce réseau ARPANET est le premier réseau informatique. Il est aussi l'ancêtre direct d'Internet.

Communiquer après une attaque nucléaire

Dès 1966, Robert Taylor (1932-2017), un cadre de l'Agence des projets de recherche avancées (ARPA) du ministère américain de la Défense, et son collègue Lawrence Roberts (1937-2018) s'intéressent à la construction d'un réseau qui permettrait de relier entre eux les ordinateurs des laboratoires de recherche universitaires et industriels qu'ils financent. L'objectif ultime est de créer un réseau informatique décentralisé qui puisse survivre à une attaque nucléaire. Le réseau téléphonique américain est en effet très vulnérable, la destruction de quelques centraux téléphoniques étant suffisante pour qu'il ne fonctionne plus.

La commutation de paquets

Afin de construire ce réseau informatique, Taylor et Roberts vont se reposer sur les travaux de Paul Baran (1926-2011), un ingénieur de la Rand Corporation, un think-tank de la région de Los Angeles. Quelques années plus tôt, Baran a en effet proposé de découper les données envoyées d'un ordinateur à un autre en « blocs » ou « paquets », et d'adresser ces paquets à leur destinataire final par l'intermédiaire d'une multiplicité de « nœuds ». Ainsi, même si un nœud n'est plus fonctionnel, tous les paquets parviennent à l'ordinateur auquel ils sont destinés.

Un réseau aux usages multiples

Utilisant l'architecture conçue par Baran, Taylor et Roberts construisent leur réseau informatique, qu'ils baptisent ARPANET, avec l'aide de Bolt, Beranek and Newman (BBN), une entreprise de consultants informatiques. À ses débuts, en octobre 1969, ARPANET est composé de trois nœuds installés dans la société BBN, l'université UCLA et le Stanford Research Institute. Le réseau s'étend rapidement aux autres universités et entreprises qui font des recherches pour l'ARPA. ARPANET permet d'échanger des données et des logiciels entre équipes de recherche. À partir de 1972, il est aussi de plus en plus utilisé pour envoyer des courriels.

Extension du domaine d'ARPANET

Après les trois nœuds initiaux, le réseau s'étend rapidement. Il compte treize nœuds en décembre 1970, puis, pendant la première moitié des années 1970, le réseau croît au rythme de près d'un nœud par mois, pour atteindre 61 nœuds en 1975. Ce premier réseau deviendra le cœur du futur Internet, et surtout, un outil de développement des nouvelles techniques de communication.

Un ordinateur de travail connecté grâce à ARPANET, vers 1970.

D'ARPANET à Internet

En 1973, Robert Kahn et Vinton Cerf, deux informaticiens et cadres d'ARPA, s'attellent au problème de la connexion d'ARPANET à d'autres réseaux informatiques également financés par ARPA. Cela les amène à concevoir, l'année suivante, un protocole « universel » qui permet d'acheminer les paquets aux ordinateurs auxquels ils sont adressés, quel que soit le réseau auquel ils appartiennent. Ce protocole nommé TCP/IP permettra plus tard la création d'Internet. Pendant les années 1980, les réseaux informatiques s'internationalisent et s'affranchissent petit à petit de leurs origines militaires. Mais ce n'est qu'en 1995 qu'Internet, le réseau des réseaux, devient complétement privé.

1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020

1986 Accident nucléaire à la centrale de Tchernobyl

Ouverture du tunnel sous la Manche 1994

2001 Lancement de l'encyclopédie Wikipédia

2016 Victoire du programme AlphaGo contre un joueur de go professionnel

1969

Deux hommes marchent sur la Lune

Le 21 juillet 1969, l'être humain pose pour la première fois le pied sur la Lune. Cet événement, au-delà du contexte politique et du défi technique qu'il représente, change le regard que ce dernier porte sur sa propre planète, la Terre.

La course à l'espace

Non contents de doubler les Américains en plaçant en orbite le premier satellite artificiel (▸ 1957), les Soviétiques confirment leur avance technologique en mettant en orbite le cosmonaute Youri Gagarine en avril 1961. Le mois suivant, John Fitzgerald Kennedy, récemment élu, annonce que la NASA enverra un homme sur la Lune avant la fin de la décennie. Portés par la volonté de reprendre aux Soviétiques la première place, les Américains se lancent dans la course à la Lune.

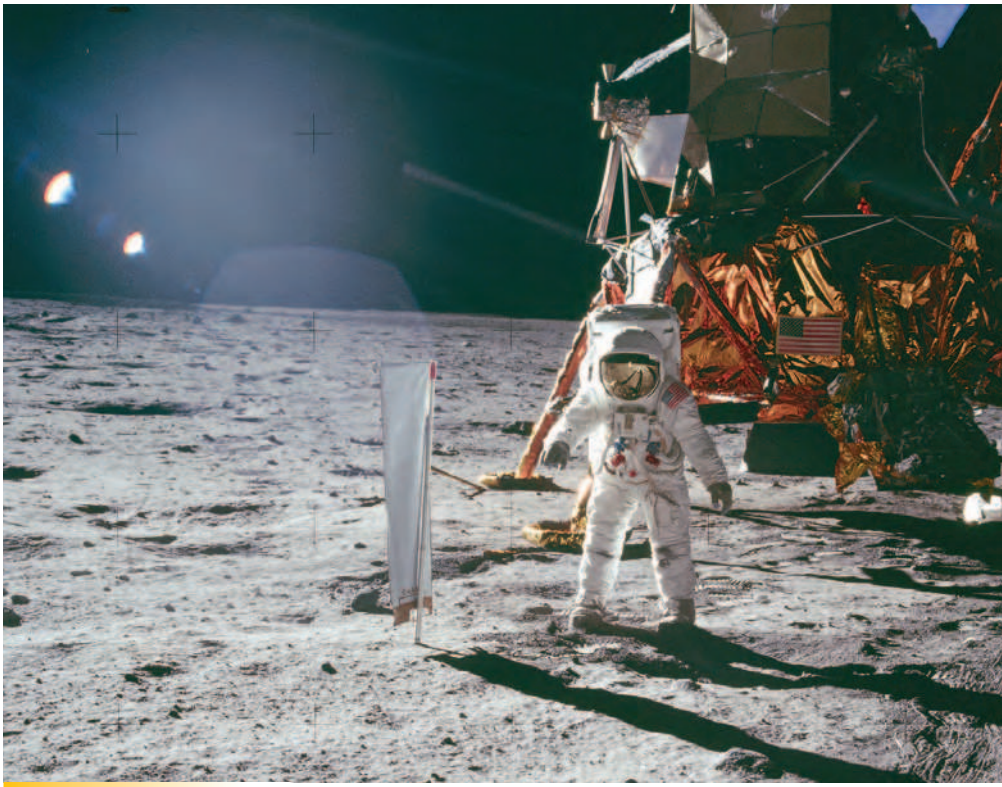
« On a marché sur la Lune »

Au programme Mercury, lancé dès 1957 par le président américain Dwight Eisenhower et visant à placer un homme en orbite, succède le programme Apollo qui doit envoyer des hommes sur la Lune. Les missions de préparation remplissent leurs objectifs. Et malgré l'accident d'Apollo 1, qui coûte la vie à trois astronautes, le calendrier est maintenu.

Le 16 juillet 1969, la mission Apollo 11 quitte la Terre, le 19 juillet, les pilotes se placent en orbite lunaire et, le 20 juillet, le module lunaire se pose dans la mer de la Tranquillité. Le 21 juillet, à 2 h 56 TU, des centaines de millions de personnes se figent devant les écrans et regardent, pendant deux heures et demie, les astronautes Neil Armstrong et Edwin Buzz Aldrin évoluer sur le sol lunaire.

Les missions suivantes

Des dix missions lunaires initialement prévues, six seulement vont alunir. Une fois le défi gagné, l'attention du public retombe. L'intérêt scientifique se porte dès lors vers le projet de la station orbitale Skylab destinée à étudier, entre autres, les effets de l'apesanteur sur le corps humain pour des missions spatiales de longue durée vers la Lune ou vers Mars. Envisagée au départ comme un défi idéologique, cette aventure spatiale reste toutefois un des faits les plus marquants de l'histoire de l'humanité.



« Objectif Lune »

Faire marcher un être humain sur la Lune est le fruit d'une longue et intense préparation. Les vols spatiaux habités Mercury et Gemini testent le lanceur Saturn V, précisent les techniques d'arrimage et les sorties extravéhiculaires. Les vols Apollo 7 à Apollo 10 expérimentent l'aller-retour Terre-Lune, survolent la Lune pour faire des repérages, et testent le module d'alunissage. En parallèle, des missions robotisées déposent en douceur, sur la Lune, des sondes qui analysent la consistance du sol.

Buzz Aldrin au pied du module lunaire, 1969.

De la Lune vers la Terre

Les six missions Apollo qui se posent sur la Lune y réalisent différentes mesures scientifiques et ramènent sur Terre 382 kilogrammes de roches lunaires. La moisson de données permet de mieux connaître la formation et la structure de la Lune ainsi que l'histoire de la Terre. Mais les retombées les plus importantes concernent les domaines technologiques des matériaux, de l'instrumentation, de la médecine et de l'informatique. Avec un tel exploit, le niveau d'exigence s'accroît dans la conduite de projet et les contrôles qualité. Par ailleurs, l'impact symbolique et philosophique des vols Apollo n'est pas à négliger, éveillant, par l'image d'une Terre vue de l'espace, une conscience de sa globalité et de sa fragilité.

1972 La médecine traditionnelle chinoise offre un cadeau au monde

Tu Youyou
née en 1930

Une chercheuse chinoise en pharmacie isole une molécule pour combattre le paludisme grâce à sa connaissance profonde de la médecine traditionnelle chinoise et de la science occidentale.

Un siècle de résistance

Le paludisme, ou malaria, l'une des maladies infectieuses les plus mortelles au monde, a accompagné l'humanité dans son histoire (▸ 1962). Dès le XVII^e siècle, on utilise en Occident la quinine, un remède naturel extrait de l'écorce d'un arbuste originaire d'Amérique du Sud. C'est la première et principale drogue utilisée pour combattre la maladie jusqu'au XX^e siècle.

Des molécules synthétiques antipaludiques, plus efficaces que la quinine dans un premier temps, sont ensuite commercialisées, au début du XX^e siècle, en Allemagne et en France. Mais au fil du temps, la résistance de l'agent pathogène du paludisme à ces traitements s'accroît.

Un retour aux sources salvateur

Face à l'échec de la médecine occidentale, la chercheuse en pharmacie Tu Youyou prête attention aux recettes traditionnelles chinoises contre les fièvres. Elle passe en revue des centaines de remèdes populaires obtenus à partir de plantes, d'animaux et de minéraux, certains connus en Chine depuis plus de 2 000 ans.

Après un tri minutieux, c'est l'extrait d'armoise annuelle (*Artemisia annua*), une herbe appelée « qinghao » en chinois, qui s'avère le plus efficace contre le paludisme. En 1972, par des méthodes biochimiques contemporaines, Tu Youyou et son équipe arrivent à isoler l'artémisinine, le principe actif de l'armoise qui sert à fabriquer des médicaments antipaludiques encore aujourd'hui.

L'alliance de l'Orient et de l'Occident

Après l'obtention du prix Nobel de physiologie ou médecine en 2015, Tu Youyou mène un combat pour le rapprochement des traditions scientifiques chinoises et des méthodes scientifiques contemporaines. Bien que certaines formes de résistance à ce nouveau remède aient déjà été observées dans le sud-est de l'Asie, l'artémisinine reste l'une des principales découvertes du XX^e siècle en médecine tropicale.

Le parasite et son vecteur

Le paludisme est une maladie infectieuse provoquée par le *Plasmodium falciparum*, un parasite transmis à l'homme par des piqûres de moustiques femelles infectées du genre *Anopheles*. Le parasite se développe dans les cellules du foie et les globules rouges du patient et provoque des accès de fièvre caractéristiques de l'affection. Le moustique est qualifié de vecteur.

« Grâce à la découverte de l'artémisinine, nous avons compris les points forts de la médecine chinoise et occidentale. De grands progrès sont à venir si leurs forces sont intégrées. »

Tu Youyou, Discours de réception du prix Nobel, 2015.

Une lutte inachevée

Fréquente en Europe jusqu'au milieu du XX^e^ siècle, le paludisme sévit de nos jours dans les régions tropicales. L'Organisation mondiale de la santé estime à environ 220 millions le nombre de personnes affectées par cette maladie, pour la plupart en Afrique subsaharienne. La mortalité est évaluée à plus de 400 000 décès par an et concerne en bonne partie des enfants de moins de cinq ans. Plusieurs moyens sont employés pour combattre ce fléau, comme la distribution de moustiquaires imprégnées d'insecticide, l'assèchement des eaux stagnantes nécessaires à la reproduction du moustique ou les traitements thérapeutiques à base d'artémisinine, la molécule isolée par Tu Youyou.

1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020

1981 Début de l'épidémie du sida

1986 Première greffe cœur-poumon

1997 Clonage d'un mouton nommé Dolly

2003 Découverte de l'homme de Florès

2012 Invention de CRISPR

1977

Avec l'Apple II, les micro-ordinateurs se popularisent

Apple, entreprise créée par Steve Jobs et Steve Wozniak dans la Silicon Valley, transforme les ordinateurs personnels, qui étaient seulement connus jusque là d'une petite communauté de passionnés, en produits de grande consommation.

Le Homebrew Computer Club

Située au sud de San Francisco, la Silicon Valley ou « vallée du silicium » est un centre important d'innovation technologique. C'est le berceau de la micro-informatique. En 1975, l'ingénieur informaticien Lee Felsenstein (né en 1945) y crée un club, le Homebrew Computer Club, dont l'objectif est de promouvoir la nouvelle technologie des ordinateurs personnels. Il attire plusieurs centaines de passionnés d'électronique et d'informatique, dont Steve Jobs (1955-2011) et Steve Wozniak (né en 1950). Ses membres y présentent les ordinateurs qu'ils conçoivent et fabriquent chez eux.

La création d'Apple

C'est pour ses amis du club que Wozniak crée en 1976 son premier ordinateur, l'Apple I. Voyant une opportunité commerciale dans cette machine, Jobs convainc Wozniak de créer avec lui une start-up qu'ils vont appeler Apple. Jobs obtient des financements de capital-risqueurs, des financiers qui investissent dans les nouvelles entreprises de haute technologie en achetant leurs actions. Il recrute aussi d'anciens cadres d'Intel et d'autres entreprises de la Silicon Valley pour développer sa société.

L'Apple II

> *« Le simple est parfois plus difficile que le complexe : il faut travailler dur pour faire le ménage dans ses pensées et réussir à faire simple. »*
>
> Steve Jobs, *Business Week*, 1998.

En 1977, ces investissements et l'apport de savoir-faire managériaux permettent à Apple de commercialiser la nouvelle machine de Wozniak, l'Apple II, à une grande échelle. Alors que l'Apple I et les autres ordinateurs personnels vendus jusque-là sont assemblés par leurs acheteurs, l'Apple II arrive déjà tout construit. Il est beaucoup plus facile à utiliser. Il est aussi beaucoup plus rapide. Bénéficiant d'une bonne campagne de publicité, l'Apple II suscite un vrai engouement. Il est vendu à plusieurs centaines de milliers d'exemplaires à la fin des années 1970.

L'Apple II, pour toute la famille

Afin de vendre sa nouvelle machine, Apple doit expliquer à un large public ce qu'est un micro-ordinateur. Cela conduit l'entreprise à lancer une campagne de publicité expliquant ses multiples usages : l'Apple II permet de gérer les finances de la famille, d'aider les enfants à améliorer leurs connaissances en mathématiques et de jouer aux jeux vidéo. Ce qui n'empêche pas les publicités de véhiculer les préjugés sexistes de l'époque !

Publicité pour l'Apple II, 1977.

La Silicon Valley, grand centre d'innovation

Créée par des « bidouilleurs » passionnés de radio et des électroniciens de Stanford et de Berkeley pendant les premières décennies du XX^e^ siècle, la Silicon Valley prend son essor après la Seconde Guerre mondiale. Elle devient alors un grand centre d'innovation pour les composants électroniques, notamment les circuits intégrés (► 1947). L'émergence d'une industrie de la microélectronique puissante autour d'Intel et d'AMD va rendre possibles de nouvelles vagues d'innovation dans la région : jeux vidéo avec Atari, micro-ordinateurs (Apple), stations de travail (Sun Microsystems), routeurs (Cisco), services Internet (Google), et réseaux sociaux (Facebook). Au début du XXI^e^ siècle, la Silicon Valley domine les industries numériques à l'échelle mondiale.

1977

Deux sondes voguent jusqu'aux confins du Système solaire

Deux sondes jumelles Voyager 1 et Voyager 2 quittent la Terre en 1977 pour rendre visite à Jupiter et Saturne. Prolongée, leur mission les propulse à la découverte du milieu interstellaire.

Le projet du « Grand Tour »

À la fin des années 1960, dans l'euphorie de la mission Apollo 11 (▸ 1969), un projet d'exploration baptisé « Programme Grand Tour » est lancé par la NASA dans le but d'explorer les planètes les plus éloignées du Soleil : Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton. En effet, entre 1979 et 1989, ces planètes se trouvent dans une conjonction exceptionnelle, qui rend le voyage particulièrement économique en carburant pour les sondes.

Mais pendant les années 1970, les budgets de la NASA sont drastiquement réduits. Le projet de mise en orbite du télescope Hubble et celui de la navette spatiale deviennent prioritaires. Finalement, deux sondes Voyager sur quatre partent en 1977 en direction des seules Jupiter et Saturne, les plus grosses planètes du Système solaire.

Un petit tour exemplaire

Les sondes Voyager, d'une durée de vie initiale de cinq ans, quittent la Terre à l'été 1977 et arrivent au voisinage de Jupiter en 1979, où elles se séparent. Elles embarquent divers instruments pour étudier la composition de l'atmosphère et le champ magnétique des deux planètes géantes.

Voyager 1 pénètre dans le système planétaire de Saturne en novembre 1980, puis se dirige vers les confins du Système solaire. Voyager 2 visite Saturne en août 1981. La NASA obtient alors le budget pour prolonger les missions afin d'étudier les régions lointaines du Système solaire.

Vers les confins du Système solaire

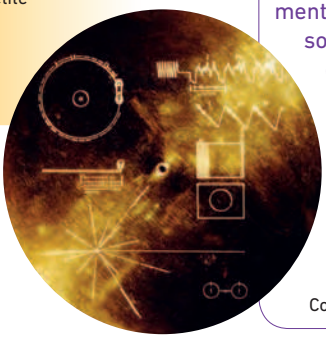
Voyager 2 survole Uranus en janvier 1986 et poursuit vers Neptune, qu'elle frôle en août 1989. Les deux sondes sont ensuite chargées d'étudier la limite d'influence des vents solaires qui repoussent les particules de l'espace interstellaire. Au-delà de cette limite, elles pourront nous informer sur la composition du milieu interstellaire.

Depuis 2013, les sondes ont franchi cette limite et envoient toujours des données. Leur réserve d'énergie devrait leur permettre de fonctionner jusqu'en 2025-2030.

Une abondante moisson scientifique

Grâce aux missions Voyager, des anneaux sont découverts autour de Jupiter et d'Uranus et ceux de Saturne sont analysés en détail. D'intenses phénomènes météorologiques sont observés sur Jupiter, Saturne et Neptune. Une vingtaine de nouveaux satellites sont découverts autour de ces planètes, certains se révélant surprenants : Io avec ses volcans, Triton avec ses geysers, Europe couverte de glace et Encelade à la surface hétérogène.

La grande et la petite taches sombres de Neptune photographiées par Voyager 2, 1989.



Messagères de l'humanité

Comme les sondes Pioneer qui les ont précédées, les sondes Voyager embarquent un disque gravé contenant diverses informations sur leur planète d'origine. Des paysages, des sonorités terrestres ou encore des portraits humains y sont enregistrés. La variété des langues, quelques œuvres littéraires et musicales informent sur nos civilisations. Ces messages sont destinés à d'éventuelles sociétés extraterrestres. En effet, Voyager 1 passera d'ici 40 000 ans dans le voisinage de l'étoile Gliese 445, pendant que Voyager 2 approchera de Ross 248. À ce moment-là, les deux sondes se seront tues depuis longtemps et glisseront indéfiniment dans l'espace interstellaire.

Couvercle du disque gravé de Voyager.

1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020

1985 Découverte du trou dans la couche d'ozone

1990 Premier rapport du GIEC sur le réchauffement global

2003 Désintégration de la navette *Columbia* en vol

2012 Image du fond diffus cosmologique par le satellite Planck

Première image d'un trou noir 2019

1983

Le CERN détecte les bosons W et Z

En utilisant de grands accélérateurs de particules, bâtis grâce à une collaboration internationale, les physiciens étudient les collisions de particules fondamentales et révèlent les interactions qui tiennent le monde ensemble.

Un « zoo » de particules

Forts de l'intérêt suscité par la recherche nucléaire aux États-Unis durant la guerre froide (▸ 1945, p. 300), de grands accélérateurs de particules fleurissent, à Brookhaven et Stanford (▸ 1932). Dans ces grands instruments, les collisions toujours plus énergétiques entre protons ou électrons produisent des cascades de nouvelles particules aussi exotiques qu'éphémères. On cherche alors à classer et à comprendre par de nouveaux modèles la manière dont ces particules « élémentaires » interagissent entre elles.

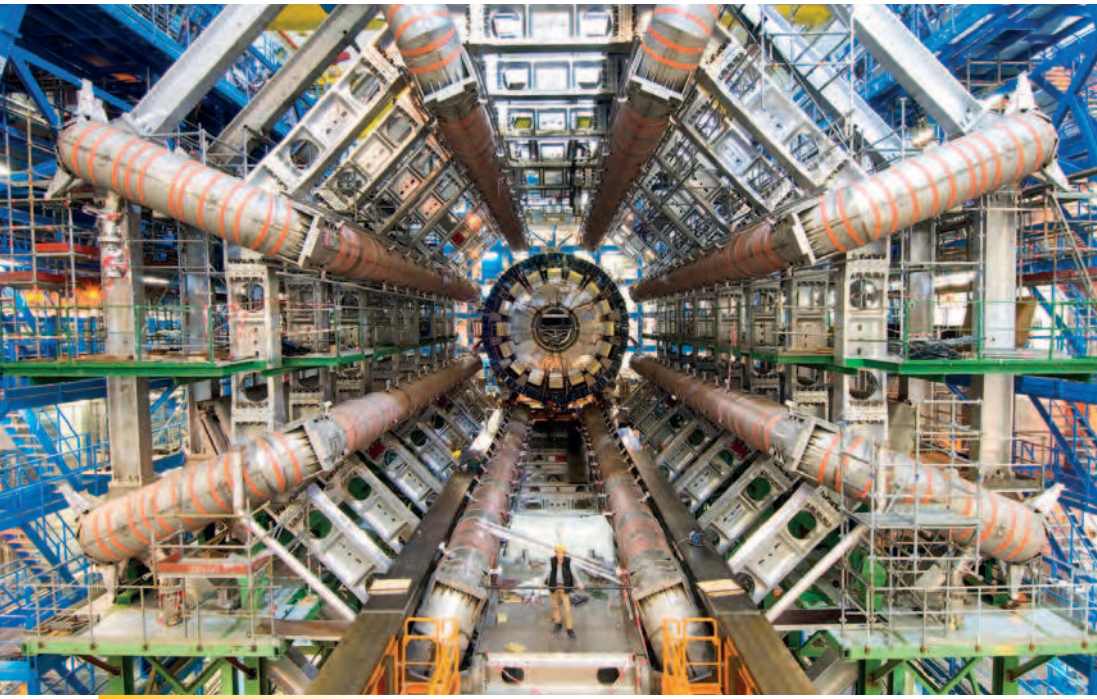
Le « modèle standard », proposé en 1961 par Sheldon Glashow (né en 1932), parvient à expliquer l'origine de la force électromagnétique et des interactions faibles responsables des désintégrations radioactives (▸ 1898). En 1967, Steven Weinberg (né en 1933) et Abdus Salam (1926-1996) l'aident à parfaire ce modèle, qui prédit alors l'existence de deux nouveaux types de particules, les bosons W et Z.

L'Europe se construit au CERN

Les scientifiques européens ne peuvent suivre le rythme de leurs collègues américains et fournir les budgets nécessaires. La collaboration s'impose. Avec l'aide des États-Unis, qui encouragent à cette période toute initiative d'union européenne, le Centre européen de recherches nucléaires (CERN) est créé à Genève en 1954. Cinq ans plus tard, son premier accélérateur de particules, le Linac, est mis en fonctionnement.

C'est là, au CERN, que les bosons W et Z seront découverts. Dès 1973, l'énorme chambre à bulles « Gargamelle » détecte des trajectoires d'électrons défléchis par des bosons Z. Une machine plus puissante produisant des collisions proton-antiproton est alors mise en chantier et permet, en 1983, de confirmer l'existence des bosons tant recherchés.

Le modèle standard, comme cadre d'interprétation de la physique subatomique, s'en trouve consolidé. D'autant plus qu'en 2012 le CERN annonce avoir détecté une autre particule prédite par ce modèle, le boson de Higgs, responsable de la masse des particules élémentaires.



Une usine à particules

Depuis la seconde moitié du XXe siècle, la combinaison de grands accélérateurs – celui du CERN dispose d'un anneau de vingt-sept kilomètres de circonférence – et la modélisation mathématique révèlent l'existence d'une très grande diversité de particules élémentaires comme les mésons, les gluons ou les quarks. Leurs interactions renseignent sur les conditions physiques à l'origine de l'Univers.

Calorimètre ATLAS du LHC au CERN dédié à la détection des particules.

L'unification fait la force

Au XIXe siècle, James Clerk Maxwell unifie, dans un même cadre théorique, l'électricité et le magnétisme. Ce rêve d'unité ne s'éteint pas avec la remise en cause de la physique classique par la relativité (► 1905). Einstein lui-même consacre les dernières années de sa vie à élaborer une théorie capable d'expliquer à la fois la force gravitationnelle et la force électromagnétique. Pourtant, la « théorie du tout » qui permettrait d'unifier le modèle standard et la gravitation n'existe pas encore, malgré le développement de modèles mathématiques très sophistiqués, comme la théorie des « supercordes ».

« Europe 3 - États-Unis même pas Z-Zéro [...] Les Européens sont maintenant en tête dans la course pour découvrir les constituants fondamentaux de la matière. »

Éditorial du *New York Times*, 6 juin 1983.

1983 Découvertes des bosons W et Z au CERN

1980 1990 2000 2010 2020

1986 Découverte de la supraconductivité à haute température

1994 Preuve du théorème de Fermat par Andrew Wyles

2012 Découverte du boson de Higgs au CERN

1985

Dian Fossey est assassinée au Rwanda

Dian Fossey
1932-1985

Au cœur de l'Afrique, la primatologue Dian Fossey réussit à s'intégrer dans un groupe de gorilles en liberté, et découvre que leur vie familiale et sociale n'est pas si différente de la nôtre.

Trois femmes à la rescousse

En 1963, Dian Fossey part étudier les gorilles de montagne en Afrique, encouragée par le zoologue George Schaller (né en 1933). Là-bas elle rencontre le paléontologue Louis Leakey (▸ 1959), qui souhaite connaître le comportement des grands singes en liberté afin de mieux interpréter les restes fossiles de primates disparus, y compris les fossiles d'hominoïdes. Comme elle, deux autres primatologues rejoignent le terrain dans un but similaire : Jane Goodall (née en 1934) se rend en Tanzanie pour étudier les chimpanzés et Biruté Galdikas (née en 1946) en Indonésie où elle s'intéresse aux orangs-outans.

Un portrait plus familial

Dian Fossey est la première personne qui réussit à s'intégrer dans un groupe de gorilles et à les suivre, au quotidien, dans leur environnement. Cette immersion lui permet d'acquérir une connaissance profonde et directe de leur mode de vie, de leur comportement et de leur psychologie. Elle démontre que certains traits jusque-là considérés propres aux hommes, comme la connaissance de soi et des autres, l'ennui ou l'empathie, existent chez les gorilles. Le résultat de ses recherches, très médiatisées, modifie notre perception des grands singes. Certaines associations réclament même pour eux aujourd'hui un statut juridique particulier proche de celui des humains.

Une fin tragique

Le 26 décembre 1985, Dian Fossey est retrouvée morte à l'intérieur de sa hutte dans la forêt des Virunga, au Rwanda, victime d'un violent assassinat. À ce jour non résolu, le crime serait l'œuvre de braconniers. Depuis son arrivée en Afrique, l'Américaine menait en effet un combat acharné contre la chasse illégale au gorille, ce qui lui a valu de nombreux ennemis. Cependant, sa mort n'a fait que donner plus de sens à sa bataille. Aujourd'hui, grâce à elle, les dernières populations de gorilles de montagne vivent dans des régions protégées et les effectifs augmentent.

Sciences du vivant et médecine

1940 — 1950 — 1960 — 1970

1944 Schrödinger, *Qu'est-ce que la vie ?*

1952 Théorie de la morphogenèse d'Alan Turing

1953 Découverte de la structure de l'ADN

Invention du mot « clone » par Haldane 1963

1975 Identification de la maladie de Lyme

Le seigneur des forêts africaines

Le gorille de montagne (*Gorilla beringei beringei*) est endémique des forêts d'altitude de la région des Grands Lacs, entre l'Ouganda, le Rwanda et la République démocratique du Congo. Les groupes les plus nombreux habitent les montagnes Virunga, lieu phare de l'histoire de la conservation de la nature en Afrique. C'est à cet endroit qu'est créée, à l'initiative du président américain Theodore Roosevelt (1858-1919) et du naturaliste Carl Akeley (1864-1926), la première réserve de faune sauvage en 1921, devenue plus tard premier parc national du continent.

Gorille de montagne (*Gorilla beringei beringei*).

Des animaux tellement humains

Grâce à ses travaux sur le comportement des gorilles, Dian Fossey fait tomber la cloison qui sépare traditionnellement l'homme de l'animal. Les grands singes sont très proches des humains, et ils ne sont pas les seuls. Le médecin autrichien Konrad Lorenz (1903-1989) démontre de son côté que les oisons, juste après l'éclosion, s'imprègnent du premier objet en mouvement qu'ils voient et le prennent pour leur mère. Une première rencontre qui a une influence primordiale sur le comportement social, dans le cas des oies. Les résultats de Lorenz – qui lui valent un prix Nobel de médecine ou physiologie en 1973 – montrent ainsi l'existence chez les animaux de conduites innées et d'autres qui sont le fruit de l'expérience et de l'apprentissage. La reconnaissance qui lui est accordée marque le début d'une nouvelle discipline, à l'interface entre la zoologie et la psychologie expérimentale : l'éthologie ou l'étude du comportement animal.

« J'ai souvent vu ce spectacle d'un vénérable gorille à dos argenté jouant avec son rejeton. La gentillesse extraordinaire du mâle adulte envers ses enfants apporte un démenti au mythe de King Kong. »

Dian Fossey, *Gorilles dans la brume*, 1983.

1985 Assassinat de la primatologue Dian Fossey

1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020

1981 Début de l'épidémie du sida

1986 Première greffe cœur-poumon

1997 Clonage d'un mouton nommé Dolly

2003 Découverte de l'homme de Florès

2012 Invention de CRISPR

1986

Le réacteur nucléaire de Tchernobyl explose

Dans les années 1960 et 1970, l'énergie nucléaire semble offrir une promesse d'énergie illimitée. Mais les accidents nucléaires, comme l'explosion de la centrale nucléaire de Tchernobyl, rappellent la fragilité de cette technologie.

Une promesse d'énergie

Développés initialement pour fabriquer des bombes atomiques (▸ 1945, p. 300), les réacteurs nucléaires sont utilisés pour la production d'électricité à la fin des années 1950. Une décennie plus tard, le nombre de centrales est en pleine croissance et les plans de nucléarisation prolifèrent. En France, le Premier ministre Pierre Messmer lance la construction de cinquante-huit réacteurs en dix ans, ce qui porte la part du nucléaire dans la production d'électricité dans le pays à environ 80 %.

Un risque sur un million

Symbole de modernité et d'indépendance énergétique, le nucléaire est d'abord perçu comme une technologie sûre. Le rapport Rasmussen de 1975, estime le risque, par réacteur, à environ un accident par million d'années. Dès 1979, pourtant, un accident survient à la centrale de Three Mile Island aux États-Unis. Pire encore, le 26 avril 1986, le réacteur numéro quatre de la centrale soviétique de Tchernobyl explose.

Des dizaines de personnes meurent ou sont sévèrement irradiées au moment de l'accident. Un nuage radioactif s'échappe de la centrale et affecte notamment l'Ukraine et la Biélorussie, avant de se répandre sur l'Europe. Pour éviter qu'elles soient exposées à la radioactivité, 250 000 personnes sont évacuées des régions environnantes, certains villages étant encore inhabités aujourd'hui.

Une énergie qui interroge

La catastrophe de Tchernobyl provoque l'arrêt ou le gel de la construction de nouvelles centrales nucléaires dans de nombreux pays. Des essais pour relancer la filière se multiplient à partir des années 2000, mais l'accident de la centrale nucléaire japonaise de Fukushima en 2011 remet encore une fois en question la sécurité de cette forme de production d'énergie. D'autres problèmes, comme la gestion des déchets ou la sécurité des installations face aux attaques terroristes, ajoutent à l'inquiétude qu'elle suscite.

Des dégâts de tout ordre

En plus des pertes humaines, la catastrophe de Tchernobyl a provoqué des dégâts économiques estimés à plusieurs centaines de milliards d'euros : perte d'infrastructures agricoles et industrielles, coûts du confinement du réacteur… D'autre part, et malgré la récupération des espaces par la faune sauvage après l'arrêt des activités humaines, les radiations ont eu des effets nuisibles sur les êtres vivants, notamment sur les oiseaux et les invertébrés.

La centrale de Tchernobyl, trois jours après l'accident du 26 avril 1986.

Une bonne dose de controverse

En plus des décès directement attribués à l'explosion, des milliers de personnes ont été affectées par les émissions radioactives de l'accident de Tchernobyl. Pourtant, le nombre de victimes causé par l'accident fait débat. Pour l'industrie nucléaire, on ne doit compter que quelques centaines de morts, tandis que des associations écologistes parlent de dizaines, voire de centaines de milliers de victimes. La controverse est liée à l'absence de consensus concernant les effets de faibles doses de radiation sur l'organisme. À Tchernobyl, la preuve de ces effets est rendue difficile par manque de suivi des personnes irradiées. D'autant que la chute de l'Union soviétique a entraîné de graves perturbations dans le système de santé publique en Ukraine.

1986 Accident nucléaire à la centrale de Tchernobyl

1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020

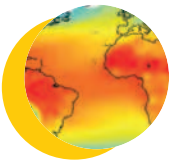
Ouverture du tunnel sous la Manche 1994

2001 Lancement de l'encyclopédie Wikipédia

2016 Victoire du programme AlphaGo contre un joueur de go professionnel

1990

La Terre se réchauffe… vraiment



Le premier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat porte sur les gaz à effet de serre. Il met en garde contre un réchauffement global de la planète. La modélisation du climat occupe très vite le centre du débat public.

Des signes de réchauffement

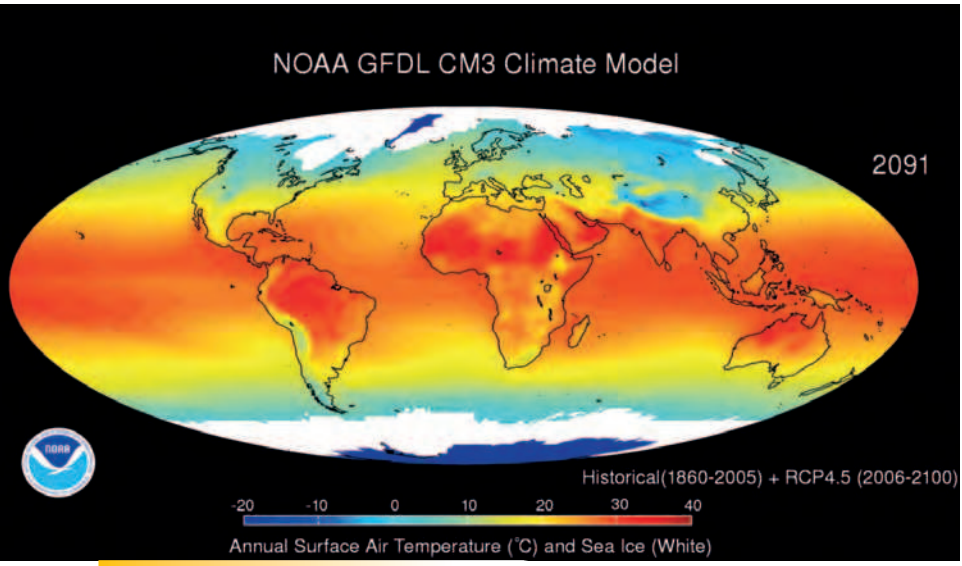
L'existence d'un lien entre l'abondance du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère et l'augmentation de la température globale est connue depuis la fin du XIXe siècle (▸ 1895, p. 258). Pourtant, ce n'est qu'à partir de 1958 qu'on commence à mesurer de manière systématique l'évolution de la concentration atmosphérique de CO_2 (▸ 1957). Le résultat de ces observations, combiné avec les premiers modèles climatiques réalisés sur ordinateur, suggère que les activités humaines peuvent provoquer des changements climatiques importants.

Des experts au chevet du climat

En 1979, le Programme mondial de recherches sur le climat est lancé et, en 1985, l'idée d'un réchauffement global dû à l'émission des gaz industriels fait déjà consensus parmi les experts. Inspiré par le succès du protocole de Montréal en faveur de la protection de la couche d'ozone, le directeur du Programme des Nations unies pour l'environnement, Mostafa Tolba (1922-2016), veut établir une convention visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Mais le secteur industriel et les États-Unis font pression pour qu'un nouvel organisme soit créé afin de ré-examiner la question plus en détail. C'est ainsi que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est établi en 1988.

Des scénarios inquiétants

Le GIEC présente ses conclusions dans un premier rapport publié en 1990. En utilisant l'état des connaissances en climatologie et la modélisation, il constate un accroissement de 0,5 °C de la température à la surface de la Terre depuis 1900, et propose quatre scénarios possibles, avec une augmentation de la température globale comprise entre 1 et 3 °C pour le siècle à venir. Entre 1995 et 2014, le GIEC produit quatre autres rapports qui réévaluent toujours à la hausse les prévisions de réchauffement. Ces documents servent à mettre en place des accords internationaux (Kyoto 1997, Paris 2015), dont l'impact sur les émissions des gaz à effet de serre reste très mitigé.



La modélisation du climat

La prédiction météorologique est une des premières applications des ordinateurs numériques (▸ 1945, p. 298). Depuis les années 1950, des modèles de circulation générale cherchent à reproduire et prédire l'évolution du climat global (▸ 1963).

Simulation de la température et de la couverture de glace de mer en 2091.

Science et politique

Le GIEC, qui compile des milliers d'études de centaines de chercheurs, est une institution hybride entre science et politique. Ses conclusions, qui doivent être approuvées unanimement par tous les États membres, sont soumises aux enjeux politiques. Pour certains de ses détracteurs, ce mode de fonctionnement tend à sous-estimer les effets du réchauffement climatique. Toutefois, il a aussi engendré des formes très sophistiquées de gestion de l'incertitude, tant au niveau des mesures que pour les extrapolations à partir de modèles.

« Nous sommes certains des éléments suivants : il existe bel et bien un effet de serre naturel et les émissions résultant des activités humaines augmentent considérablement les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre : CO_2, méthane, chlorofluorocarbures et protoxyde d'azote. Ces augmentations renforceront l'effet de serre, entraînant un réchauffement supplémentaire de la surface de la Terre. »

Premier rapport d'évaluation du GIEC, 1990.

1990 Premier rapport du GIEC sur le réchauffement global

1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020

1985 Découverte du trou dans la couche d'ozone

2003 Désintégration de la navette *Columbia* en vol

2012 Image du fond diffus cosmologique par le satellite Planck

2019 Première image d'un trou noir

1992

Un pulsar révèle ses propres planètes

Aleksander Wolszczan
né en 1946

Après des siècles d'hypothèses et d'incrédulité sur l'existence de mondes lointains, deux planètes, quatre fois plus massives que la Terre, sont détectées autour d'un pulsar de notre galaxie. L'exobiologie interroge alors la possibilité de la vie sur ces exoplanètes.

La pluralité des mondes

Épicure, trois siècles avant notre ère, déjà, conçoit l'existence d'une infinité de mondes. Au XVe siècle, le penseur Nicolas de Cues oppose au cosmos fermé des scolastiques un univers infini. Et après lui, des savants comme Giordano Bruno, Descartes, Fontenelle ou Huygens envisagent, de façon spéculative, le fait que notre Système solaire ne soit qu'un système parmi d'autres.

La question devient véritablement scientifique à la fin du XIXe siècle, avec les avancées de la mécanique céleste et des techniques d'observation. Il devient possible de détecter, dans le mouvement propre d'une étoile, des perturbations de trajectoire susceptibles de traduire la présence d'une planète en orbite. Si diverses observations signalent de telles irrégularités, elles ne sont toujours pas confirmées au milieu du XXe siècle.

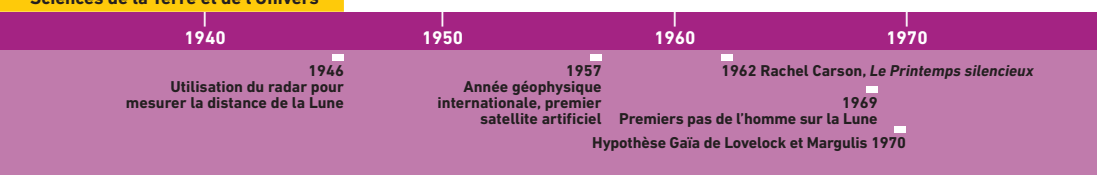
Ce n'est que dans les années 1980 que l'on pense avoir découvert des disques d'accrétion, préliminaires à la formation de planètes, autour de plusieurs jeunes étoiles, voisines de notre Système solaire. Les exoplanètes n'appartiennent plus à la science-fiction ! Des équipes se mettent à leur recherche.

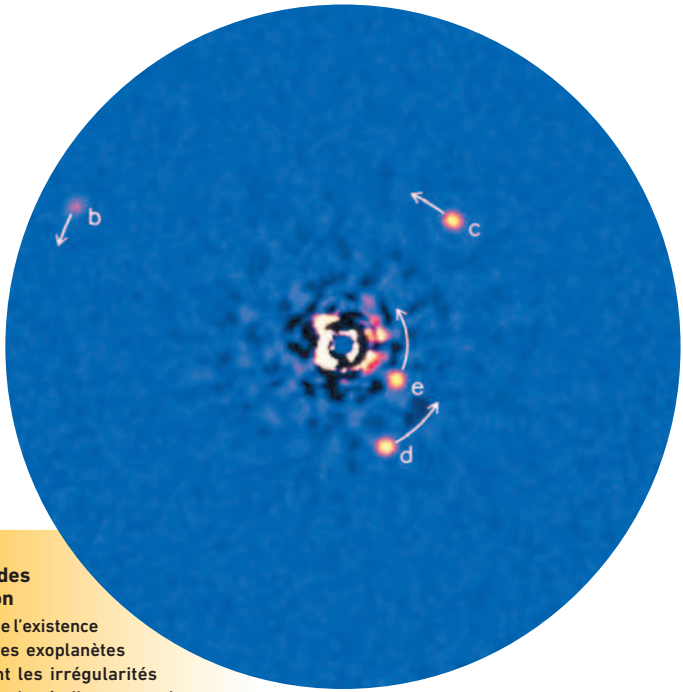
Sur la piste des exoplanètes

Les deux premières planètes extrasolaires, en rotation autour du pulsar PSR B1257 + 12, situé à 2 314 années-lumière de nous, sont découvertes en 1992 par l'astronome Aleksander Wolszczan. Et le 6 octobre 1995, à l'issue d'une collecte de données de plus d'un an, les astronomes Michel Mayor et Didier Queloz confirment la présence d'une grosse planète en rotation autour de 51 Pegasi, une étoile aux caractéristiques proches de celles de notre Soleil.

Dès lors, les annonces se succèdent. Une centaine d'exoplanètes sont découvertes en quelques années. En 2017, on en dénombre plus de 3 600 ! Les astronomes étudient activement leurs caractéristiques et les mécanismes de leur formation. Mais c'est la découverte d'objets célestes semblables à la Terre qui reste une des quêtes les plus fascinantes de l'astronomie contemporaine.

Sciences de la Terre et de l'Univers





L'évolution des méthodes de détection

On soupçonne l'existence des premières exoplanètes en observant les irrégularités de trajectoire des étoiles autour desquelles elles gravitent. À partir de 1990, on préfère une méthode précise : la mesure des fluctuations parasites de la vitesse de l'étoile lorsqu'elle se déplace vers la Terre ou s'en éloigne (effet Doppler-Fizeau). Aujourd'hui on utilise aussi la méthode du transit, qui mesure la variation de luminosité de l'étoile lorsqu'une planète passe devant.

Image des quatre planètes gravitant autour de l'étoile HR 8799, située à environ 130 années-lumière de la Terre, dans la constellation de Pégase.

« Une des questions les plus brûlantes de l'astronomie concerne la fréquence des objets planétaires dans la Galaxie autour d'étoiles autres que le Soleil. […] Il pourrait exister beaucoup d'objets de ce type dans la Galaxie. »

Otto Struve, dans un article de 1952.

Une possible vie extraterrestre

Avec la découverte d'exoplanètes évoluant autour d'étoiles semblables à notre Soleil, les scientifiques réalisent que notre Système solaire n'est pas unique dans l'Univers et ont en tête la question que tout le monde se pose : existe-t-il des formes de vie extraterrestre ? Pour y répondre, la recherche se focalise sur les exoplanètes du type Terre ou super-Terre (de masse supérieure à celle de la Terre) gravitant dans la zone habitable de leur étoile, c'est-à-dire à une distance compatible avec la présence d'eau liquide et d'une atmosphère. Une nouvelle discipline, l'exobiologie, naît alors dans les années 1960 pour étudier les conditions propices à l'apparition et au développement du vivant hors de la Terre. Elle se met en quête, dans notre Système solaire comme sur les exoplanètes, de traces de molécules susceptibles de participer au métabolisme d'éventuels êtres vivants.

1992 Découverte des premières planètes extrasolaires

1980 — 1990 — 2000 — 2010 — 2020

1985 Découverte du trou dans la couche d'ozone

1990 Premier rapport du GIEC sur le réchauffement global

2003 Désintégration de la navette *Columbia* en vol

2012 Image du fond diffus cosmologique par le satellite Planck

Première image d'un trou noir 2019

2001

L'encyclopédie collaborative Wikipédia voit le jour

Plusieurs projets d'encyclopédies en ligne, universelles et gratuites, sont lancés à la fin des années 1990. Parmi elles, Wikipédia rencontre un succès planétaire.

De l'utopie 1.0 à sa réalisation 2.0

Rendre accessibles tous les savoirs du monde dans un lieu unique, ouvert à tous. Voilà le projet du Mundaneum, lancé en 1895 par Henri La Fontaine (1854-1943) et Paul Otlet (1868-1944). À partir de 1920, plus de quinze millions de documents sont ainsi présentés au public au Palais du cinquantenaire de Bruxelles pendant une quinzaine d'années. Mais il faut attendre la naissance du Web en 1992 pour voir se réaliser à nouveau, de façon pérenne mais virtuelle cette fois, une bibliothèque universelle accessible à tous.

En 1999, Richard Stallman (né en 1953) et Jimmy Wales (né en 1966) lancent chacun de leur côté une encyclopédie en ligne : GNUpedia et Nupedia. Rapidement, Stallman abandonne son projet devant Nupedia, qui peine pourtant à se développer. Le lourd processus de validation des articles rebute les contributeurs. En 2001, pour l'alléger, Wales et Larry Sanger (né en 1968), éditeur en chef, proposent aux auteurs de saisir directement leur texte grâce à un « wiki », une application facilitant la saisie et la modification collaborative de pages, dans une base d'articles provisoires baptisée « Wikipédia ». Cette forme éditoriale plaît. À tel point que Wikipédia remplace Nupedia en 2003.

Devenir « respectable »

Les contributions à Wikipédia se font sans validation par un comité d'experts, une idée perçue au départ comme « subversive ». Mais malgré de nombreux propos médisants, le contenu et la fréquentation de Wikipédia explosent. Dès 2005, une étude atteste que le taux d'erreurs de son corpus est comparable à celui de l'*Encyclopædia Britannica*. Pour conforter sa respectabilité, les administrateurs de Wikipédia sollicitent des experts pour obtenir leurs contributions.

Il faut attendre les années 2010-2011 pour que l'encyclopédie libre soit acceptée par le milieu universitaire. De nombreux enseignants l'adoptent alors, encadrant leurs étudiants dans la rédaction de contributions éditoriales, les sensibilisant ainsi à la fiabilité des données, à l'importance de la citation et à la qualité rédactionnelle.

Un succès fulgurant et planétaire

La forme de partage proposée par Wikipédia plaît instantanément aux contributeurs. Six semaines après sa création, en 2003, 1 000 articles sont écrits. Huit mois plus tard, ce sont 10 000 articles qui viennent enrichir cette encyclopédie naissante. En 2004, 450 000 articles y sont rédigés, dont 200 000 en anglais. Le succès est planétaire. Aujourd'hui 15 langues proposent chacune plus de 1 million d'articles à leurs lecteurs, l'anglais en offre plus de 5 millions et le français, plus de 2 millions.

Monument érigé en l'honneur de Wikipédia à Stubice (Pologne).

Une nouvelle forme de gouvernance

Wikipédia représente une expérience originale d'organisation collective. Rapidement, le fonctionnement éditorial se précise : les faits doivent être présentés sans interprétation, des sources reconnues doivent être citées, etc. Des mécanismes de contrôle et de protection sont peu à peu installés : des robots surveillent toutes tentatives malveillantes et les bloquent. En parallèle, des procédures de résolution des conflits entre contributeurs favorisent la cohésion. Il s'avère que les corrections successives mènent en général à une version stable des articles. Cette forme de gouvernance permet ainsi l'élaboration d'une connaissance à destination de tous qui échappe aux pouvoirs étatiques et aux logiques de marché.

2001 Lancement de l'encyclopédie Wikipédia

1980 — 1990 — 2000 — 2010 — 2020

1986 Accident nucléaire à la centrale de Tchernobyl

1994 Ouverture du tunnel sous la Manche

2016 Victoire du programme AlphaGo contre un joueur de go professionnel

2012

CRISPR révolutionne la biotechnologie

Deux biologistes conçoivent une nouvelle technique de manipulation génétique très puissante et d'une grande facilité d'utilisation. L'outil CRISPR qu'elles inventent est adopté massivement afin de transformer le matériel génétique des êtres vivants.

Une méthode rapide et efficace

En 2012, la biologiste française Emmanuelle Charpentier (née en 1968), et sa collègue américaine Jennifer Doudna (née en 1964), détournent une stratégie de défense naturelle des bactéries, à savoir leur capacité à se protéger des virus en cisaillant leur ADN, pour développer un puissant outil de manipulation génétique.

Ce « ciseau génétique », nommé CRISPR, permet de réécrire les gènes à bas coût et surtout de le faire très rapidement. Alors qu'il fallait jusque-là un an de travail pour modifier un gène, la nouvelle technique permet de le manipuler en une semaine !

La ruée vers CRISPR

Des milliers d'entreprises et de laboratoires universitaires adoptent la technologie CRISPR afin d'améliorer les caractéristiques des êtres vivants. Avec CRISPR, des chercheurs créent des saumons qui grandissent très vite, du riz résistant à la sécheresse et même des champignons de Paris qui ne brunissent pas. De nombreuses sociétés, certaines établies par Charpentier et Doudna, apparaissent aussi, avec pour objectif de développer de nouvelles thérapies contre le cancer, la thalassémie (anémie due à une anomalie génétique de la synthèse de l'hémoglobine) et d'autres maladies du sang.

La manipulation du génome humain

Bientôt se pose la question de l'utilisation du nouvel outil pour changer le génome humain. Craignant que des biologistes modifient les gènes d'embryons humains et que ces travaux entraînent une controverse qui nuirait aux recherches sur CRISPR, Doudna prend l'initiative en 2015 de proposer un moratoire sur les expériences menées sur les cellules germinales, ces cellules qui transmettent le patrimoine génétique d'un individu à ses descendants. Ce moratoire est respecté jusqu'en 2019, lorsqu'un chercheur chinois annonce avoir édité les cellules germinales de deux jumelles afin de les immuniser contre le sida.

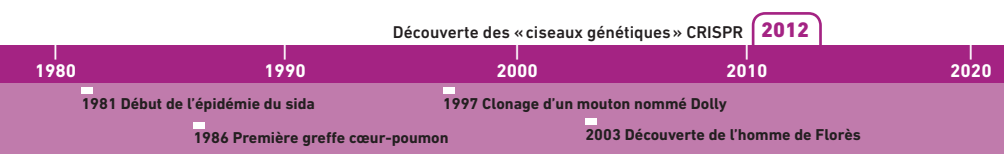
Stars de la biologie

Dès la parution de leur article sur la technologie CRISPR dans la revue *Science* en 2012, Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna deviennent des stars de la biologie. Elles obtiennent des dizaines de prix au cours des années suivantes.

Emmanuelle Charpentier (à droite) et Jennifer Doudna (à gauche) reçoivent le Breakthrough Prize in Life Sciences en 2015.

La guerre des brevets

Comme toutes les technologies révolutionnaires, CRISPR fait l'objet d'une guerre sans merci pour les brevets. Cette guerre oppose Charpentier, Doudna et les universités de Vienne et de Californie d'un côté, à Feng Zhang, un chercheur du Broad Institute au MIT, de l'autre. Zhang est le premier à avoir démontré que CRISPR permet de manipuler les cellules animales et humaines. En 2012, les deux groupes déposent des demandes de brevet sur CRISPR auprès de l'USPTO, l'agence américaine pour les brevets. Comme Zhang a opté pour une procédure accélérée, l'USPTO lui accorde le brevet sur CRISPR ! Cette décision entraîne dès lors de nombreux procès. Les enjeux financiers et commerciaux sont en effet importants. Les entreprises fondées par Charpentier, Doudna et Zhang ont toutes besoin de licences sur ces brevets pour commercialiser leurs thérapies !



2017

AlphaZero bat Stockfish aux échecs

AlphaZero, un programme informatique de Google, gagne une série de parties d'échecs contre Stockfish, le meilleur logiciel du domaine. Ce succès marque l'avènement d'une nouvelle forme d'intelligence artificielle, basée sur les réseaux de neurones.

Des programmes très novateurs

La start-up londonienne DeepMind est fondée en 2010 par Demis Hassabis (né en 1976), champion d'échecs, informaticien et spécialiste de neurosciences cognitives. Rachetée par Google quatre ans plus tard, la société conçoit des logiciels capables de jouer aux jeux-vidéo et au go, un jeu asiatique de stratégie.

De plus en plus puissants, les programmes de DeepMind – basés sur des réseaux neuronaux – parviennent à battre les meilleurs joueurs de go du monde. En 2017 Hassabis et son équipe organisent un match opposant AlphaZero, la version la plus récente de leur programme, à Stockfish, le meilleur moteur d'échecs de l'époque.

Un opposant de taille

Stockfish repose sur des principes différents de ceux d'AlphaZero. Il se fonde sur l'expérience accumulée des plus grands champions d'échecs ainsi que sur de très grandes puissances de calcul, afin de tester toutes les possibilités de mouvements des pièces et de choisir les meilleures.

AlphaZero, de son côté, apprend à jouer en faisant des millions de parties. Utilisant des réseaux de neurones artificiels qui reproduisent le fonctionnement du cerveau, il joue contre lui-même et analyse les résultats de ces parties, afin de jouer plus efficacement à l'avenir.

Une victoire retentissante

Alors qu'AlphaZero ne sait jouer aux échecs que depuis quelques heures, après tout de même avoir joué une quarantaine de millions de fois contre lui-même, il remporte une centaine de parties contre Stockfish. Il doit ce succès aux mouvements qu'il a inventés et qui n'ont jamais encore été pratiqués par des joueurs humains. Cette victoire et la remarquable créativité d'AlphaZero ont un immense retentissement. Elles démontrent le grand potentiel qu'offrent les réseaux neuronaux pour résoudre des problèmes extrêmement complexes. D'après certains observateurs, cette technologie conduirait même à l'avenir à l'apparition de formes d'intelligence suprahumaines (▸ dossier, p. 354-355).

Les promesses d'AlphaZero

Après avoir atteint le niveau des meilleurs champions de go, de shogi et d'échecs, et battu Stockfish, AlphaZero bat maintenant les humains dans *Capture the flag*, un jeu vidéo très complexe. Il a été aussi utilisé pour simuler le repliement des protéines.

Google et l'intelligence artificielle

Fondée dans la Silicon Valley en 1998, Google propose un moteur de recherche gratuit aux internautes. La société monétise ce service en vendant aux annonceurs des informations sur les utilisateurs de son moteur. Les énormes bénéfices qu'en retire Google lui permettent de développer de nouveaux produits et services comme YouTube ou Android, un système d'exploitation pour smartphones. Comme les autres géants de la Silicon Valley, Google investit chaque année des milliards de dollars dans l'intelligence artificielle afin d'améliorer ces produits et d'en développer de nouveaux. La filiale de Google, DeepMind, constitue le fer de lance de ces efforts.

« Bien sûr, je suis impatient de savoir ce qu'AlphaZero peut nous apprendre sur le jeu d'échecs. C'est la grande promesse de l'ère des machines : elles parviennent à identifier des règles que les humains ne peuvent détecter. »

Gary Kasparov, au sujet de la rencontre AlphaZero-Stockfish, 2017.

Montée en puissance de l'intelligence artificielle **2017**

1980 — 1990 — 2000 — 2010 — 2020

1986 Accident nucléaire à la centrale de Tchernobyl

Ouverture du tunnel sous la Manche 1994

2001 Lancement de l'encyclopédie Wikipédia

2016 Victoire du programme AlphaGo contre un joueur de go professionnel

L'ordinateur décode le monde

Conçu pour décoder les messages secrets pendant la guerre, l'ordinateur a un impact majeur sur les capacités de calcul et la résolution de problèmes complexes. Peu à peu, on se rend compte que l'usage universel de cet outil conduit à repenser profondément la nature du monde, de la vie et des sciences.

Des « bombes » qui calculent

Pendant la Seconde Guerre mondiale, des ressources considérables sont mobilisées pour décoder les communications de l'ennemi. Au Royaume-Uni, une équipe, qui comprend le mathématicien Alan Turing (1912-1954), développe des instruments, qu'on appelle des « bombes », capables de décrypter les messages codés par la célèbre machine Enigma des Allemands. En parallèle, les ingénieurs élaborent des outils électroniques pour calculer les trajectoires de projectiles et simuler l'explosion des bombes atomiques (▸ 1945, p. 300). Juste après la fin du conflit, le premier ordinateur électronique programmable, l'ENIAC, effectue ses premiers calculs à Philadelphie (▸ 1945, p. 298).

Le paradigme de la cybernétique

En 1948, le mathématicien Norbert Wiener (1894-1964) publie un livre, *La Cybernétique*, pour décrire ce qui paraît être le paradigme d'une nouvelle ère dans l'histoire de la pensée humaine. Ce titre est un nouveau mot qu'il a inventé et qu'il définit comme l'étude de la communication et du contrôle chez l'animal et la machine. Issue de son expérience de guerre, où la coordination hommes-machines est centrale, la cybernétique attire l'attention des spécialistes les plus divers : psychologues, économistes, physiciens, etc. Très vite, les ordinateurs électroniques se révèlent être l'outil rêvé pour créer des systèmes de contrôle de plus en plus sophistiqués. Au plus fort de la guerre froide, la défense américaine développe ainsi le système SAGE qui associe radars, ordinateurs et opérateurs humains pour réagir rapidement face à une hypothétique attaque soviétique.

> *« Il s'impose donc à nous sans plus attendre de discuter la question des pouvoirs de ces machines, d'analyser nos rapports avec elles et l'ensemble des conséquences de cette nouvelle et fondamentale révolution technique. »*
>
> Norbert Wiener, *Cybernétique et société*, 1952.

Mettre l'univers en boîte

Les grands systèmes de défense ont leurs pendants civils, en particulier dans le domaine de la météorologie (▸ 1963). Bientôt, il devient possible de modéliser l'évolution globale du système Terre (▸ 1990) et même la dynamique de galaxies entières. Les informaticiens maîtrisent de mieux en mieux les outils mathématiques et statistiques permettant de manipuler des quantités gigantesques de données. Et on célèbre déjà l'avènement du « big data », qui promet de modifier non seulement la gestion des données, mais peut-être aussi la philosophie même des sciences (▸ 2017) : lorsque l'ordinateur est capable de prédire l'évolution des systèmes les plus complexes, est-il en effet encore nécessaire de rechercher une « explication » saisissable par l'esprit humain au-delà de cette capacité prédictive ?

Le pouvoir des algorithmes

À l'origine, les algorithmes n'étaient qu'une suite d'instructions servant à résoudre des problèmes mathématiques (▸ 833). Aujourd'hui, on les retrouve partout, jusque dans les secteurs les plus sensibles. Des logiciels assistent la décision des médecins et des juges, les transports et les banques sont placés sous leur contrôle, gouvernements et armées s'appuient sur eux pour définir les enjeux de demain. Mais leur complexité rend ces algorithmes de plus en plus opaques à nos yeux. Raison de plus pour scruter avec attention les effets qu'ils ont sur nos vies !

Les utopies de la technoscience

Sciences et techniques sont à la base de la « grande accélération » qui sévit depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale. Leur capacité à transformer le monde et les sociétés génère des espoirs mais aussi des craintes, qui façonnent nos perceptions et la direction des recherches.

Des technologies futuristes

Depuis le XIXe siècle, notre perception du passé comme du futur de l'humanité est façonnée par notre rapport à la technique. Les archéologues ont divisé la préhistoire en différents « âges », correspondant aux outils des hommes : âge de pierre, de bronze ou de fer. De leur côté, les historiens pensent le monde moderne au travers du prisme de la révolution industrielle et de ses conséquences. Et aujourd'hui, les discours à propos de grands projets technologiques, censés incarner notre futur, se multiplient. L'époque contemporaine est ainsi tour à tour considérée comme l'âge de l'atome, de l'espace, de l'information ou des biotechnologies.

Rêves de croissance

Dans les années 1950 et 1960, les avancées techniques dans les domaines du nucléaire, du spatial et de l'informatique confèrent une ampleur inégalée aux discours utopistes. Les responsables des programmes nucléaires diffusent l'idée d'une énergie presque illimitée et « si bon marché qu'il ne servirait à rien d'en mesurer la consommation », et prévoient des retombées médicales et industrielles (▸ 1949). En même temps, Américains et Soviétiques présentent l'espace comme le dernier territoire à conquérir : ils rêvent de vaisseaux traversant le cosmos et de colonies humaines installées sur des planètes du Système solaire (▸ 1957). Enfin, les avancées dans le domaine de l'informatique et de la cybernétique font penser que des « cerveaux électroniques » seront bientôt capables de penser par eux-mêmes et que des robots déchargeront l'être humain des corvées les plus pénibles.

L'essor de la technocritique

Mais des voix s'élèvent bientôt pour émettre une critique vis-à-vis de ces représentations techno-optimistes d'un futur d'abondance. La controverse sur les retombées radioactives des essais atomiques (▸ 1945, p. 300) et la peur croissante d'une

apocalypse déclenchée par les armes nucléaires provoquent l'émergence d'un mouvement antinucléaire (▸ 1986). De manière inattendue, l'image symbolique du programme spatial n'est pas celle de la conquête de la Lune (▸ 1969, p. 328), mais celle de la Terre vue de l'espace, tel un îlot de vie fragile au milieu d'un univers inerte et hostile. Les dégâts de l'agriculture industrialisée engendrent une vive critique des pesticides (▸ 1962), tandis que le Club de Rome, après avoir modélisé l'évolution du système Terre en 1972, tire la sonnette d'alarme en soulignant les limites de la croissance. Tout cela contribue à l'émergence d'une écologie politique remettant en question l'usage irréfléchi des technologies.

L'heure de la controverse

Entre confiance totale dans la technoscience et conscience des limites environnementales et éthiques à respecter se jouent les controverses politiques et environnementales contemporaines. Elles interrogent non seulement la viabilité d'un projet industriel de croissance sans limite, mais sont aussi révélatrices des rapports de force des sociétés technoscientifiques. La géo-ingénierie en est un exemple instructif. Régulièrement présentée comme une solution pour lutter contre les effets néfastes du changement climatique, la généralisation de telles techniques n'est pas sans soulever d'importantes questions éthiques. Comment évaluer les risques de telles pratiques et, surtout, comment imaginer une gouvernance globale du climat ?

Le songe post-humain

Le développement de la robotique et de la bio-ingénierie offre l'espoir de vaincre la maladie et le vieillissement, mais aussi d'améliorer la performance du corps humain et du cerveau. Dotés d'une mémoire augmentée et de capteurs électroniques, les post-humains pourraient braver la mort et dépasser les limites physiologiques de l'organisme. Pourtant, ces songes, dont la faisabilité est incertaine, se heurtent à des réflexions éthiques encore non résolues : quelles valeurs articuleront la définition de ces êtres ? quel rôle pour les humains actuels dans ces futurs envisagés ?

Pour aller plus loin

Index des noms, des notions et des lieux

Pour aller plus loin

Jon Agar, ***Science in the Twentieth Century and Beyond***, Polity, 2012.

Bernadette Bensaude-Vincent et Isabelle Stengers, ***Histoire de la chimie***, La Découverte, coll. « Poches sciences », 2001.

Louis de Bonis, ***La Famille de l'homme – Des lémuriens à Homo sapiens***, Belin, coll. « Bibliothèque/Pour la Science ». 1999.

Christophe Bonneuil et Jean-Baptiste Fressoz, ***L'Événement Anthropocène – La Terre, l'histoire et nous***, Éditions du Seuil, 2016.

Clifford D. Conner, ***Histoire populaire des sciences***, Éditions du Seuil, coll. « Points Sciences », 2014.

Maurice Crosland, ***Le Langage de la science***, Desiris, 2009.

Amy Dahan Dalmedico et Jeanne Peiffer, ***Une histoire des mathématiques – Routes et dédales***, Éditions du Seuil, coll. « Points Sciences », 1986.

Ahmed Djebbar, ***Une histoire de la science arabe***, Éditions du Seuil, coll. « Points Sciences », 2001.

Pascal Duris, Gabriel Gohau, ***Histoire des sciences de la vie***, Belin, coll. « Sciences », 2011.

David Edgerton, ***Quoi de neuf ? – Du rôle des techniques dans l'histoire globale***, Éditions du Seuil, coll. « L'Univers historique », 2013.

Patricia Fara, ***Science – A Four Thousand Year History***, Oxford University Press, 2010.

Yves Gingras, ***L'Histoire des sciences***, PUF, coll. « Que sais-je », 2018.

Daniel Headrick, ***Technology – A World History***, Oxford University Press, 2009.

Thomas S. Kuhn, ***La Structure des révolutions scientifiques***, nouvelle éd., Flammarion, coll. « Champs sciences », 2018.

Hervé Le Guyader (sous la direction de), ***L'Évolution***, Belin, coll. « Bibliothèque/Pour la Science », 1998.

Richard Mankiewicz, ***L'Histoire des mathématiques***, Éditions du Seuil, 2002.

Patrick Matagne, ***Aux origines de l'écologie***, Éditions du CTHS, 1999.

Michel Morange, ***Histoire de la biologie moléculaire***, La Découverte/Poche, 2003.

Apostolos Doxiadis, Christos Papadimitriou, Alecos Papadatos, Annie Di Donna, ***Logicomix***, Vuibert, 2018.

Dominique Pestre (sous la direction de), ***Histoire des sciences et des savoirs***, trois tomes, Éditions du Éditions du Seuil, coll. « Science ouverte référence », 2015.

Dominique Pestre, ***Introduction aux Sciences Studies***, La Découverte, coll. « Repères », 2006.

Paolo Rossi, ***Aux origines de la science moderne***, Éditions du Seuil, coll. « Points Sciences », 2004.

Michel Serres (sous la direction de), Éléments d'histoire des sciences, Bordas, 1993.

Steve Shapin, ***La Révolution scientifique***, Flammarion, coll. « Nouvelle bibliothèque scientifique », 1998.

Dova Sobel, ***Longitudes – L'Histoire vraie du génie solitaire qui résolut le plus grand problème scientifique***, Éditions du Seuil, 1998.

Index des noms, des notions et des lieux

Les numéros de page en rouge correspondent aux entrées principales de la chronologie.

A

abaque ▸ 66, 98
Abbassides ▸ 96
Abrégé du calcul ▸ 64
Académie des sciences ▸ 136, **138**, 139, 147, 154, 159, 164-165, 178, 188, 208, 263, 268, 274
accélérateur de particules ▸ 282, 336
Acclimatation et domestication des animaux utiles ▸ 19
Accord de Paris ▸ 342
Ader, Clément ▸ 268
ADN ▸ 257, 288-289, **306**, 348, 352-353
aérodynamisme ▸ 268
aéronautique ▸ 268
Afrique ▸ 316
âge de la Terre ▸ 153, 216
Agence américaine de protection de l'environnement ▸ 318
agent pathogène ▸ 191
Agnesi, Maria ▸ 189
Agricola, Georgius ▸ **116**
agriculture ▸ 54-55, 270, 318
aimant ▸ 40, 80, 180, 208
air ▸ 136, 184
alchimie ▸ 110
Alcméon ▸ **24**
Aldini, Giovanni ▸ 207
Aldrin, Buzz ▸ 328
Alembert, Jean Le Rond d' ▸ 150, 156, 178
Alexandrie ▸ 42
al-Farisi ▸ 86
algèbre ▸ **64**, 99, 197
algorithme ▸ 31, 64
Alhazen ▸ **68**
al-Idrisi ▸ **70**
al-Khwarizmi ▸ **64**, 97
Allemagne ▸ 72, 202, 212, 226, 266
***Almageste*, L'** ▸ 42, 74, 97
al-Mamun ▸ 58-59, 70
Almohades ▸ 74
AlphaZero ▸ **350-351**
Ambroise de Milan ▸ 46
Amérique ▸ 106, 192, 210, 328
ammoniac ▸ 270
Ampère, André Marie ▸ 182, 208
amplificateur ▸ 302
ampoule électrique ▸ 250
Analyse des infiniment petits pour l'intelligence des lignes courbes ▸ 147
analyse ▸ 146, 280
anatomie ▸ 114, 198
Anaximandre ▸ **22**
ancêtre commun ▸ 230
Andreas Osiander ▸ 113
Andromède ▸ 280
Angleterre ▸ 87, 124, 158, 162, 174, 176, 190, 224
année géophysique internationale ▸ 312
Antarctique ▸ 162
anthropocène ▸ 175
anthropométrie ▸ 219
antibiotique ▸ 278
anticorps ▸ 191
antisepsie ▸ 222
Apollo ▸ 328
Apollonius de Perge ▸ 34
Apple ▸ 332
arabe ▸ 18, 40, 64-65, 66-67, 70, 96-97, 99
Arago, François ▸ 208, 214, 240
arc-en-ciel ▸ **86**
archéologie ▸ 304
Archimède ▸ 69
architecture de von Neumann ▸ 298
architecture ▸ 36, 76
Aristote ▸ 26, 68, 74, **78**, 82, 96, 112, 120, 132

arithmétique ▸ 30, 48, 98, 265
Arkwright, Richard ▸ **176**
arme atomique ▸ 267
arme chimique ▸ 271, 318
arme ▸ 50, 94, 118, 270
armée ▸ 211, 274, 301
Armstrong, Neil ▸ 328
ARPANET ▸ **326**
Arrhenius, Svante ▸ **258**
artère ▸ 129
arthrite ▸ 309
arts mécaniques ▸ 156
asepsie ▸ 221
astre ▸ 22, 204
astrologie ▸ 21, 43, 55, 110-111
astronomie ▸ 20, 32, 34, 42, 48, 54, 68, 84, 112, 122, 144, 150, 161, 196, 204, 214, 258
atome ▸ 28, 90, 262, 266, 277, 282, 290, 300, 304
Atomes, Les ▸ 28
attaque nucléaire ▸ 326
attracteur de Lorenz ▸ 320-321
Auguste, empereur ▸ 36
Aurillac, Gerbert d' ▸ **66**
Australie ▸ 162
australopithèque ▸ 316-317
autopsie ▸ 222
Autriche ▸ 222
Averroès ▸ **74**, 82
aviation ▸ **268**
Avicenne ▸ 110
axiome ▸ 30, 264
azote ▸ 270
Aztèques ▸ 106-107

B

Baartman, Saartjie ▸ 199
Babylone ▸ 16, 20, 54
bacille de Koch ▸ 229
Bacon, Francis ▸ **124**
Bacon, Roger ▸ 68, 80, 86
bactérie ▸ 278, 322, 348
bactériophage ▸ 306
Bagdad ▸ 64, 96
balance de torsion ▸ 183
Balance des discours ▸ 40
balancier ▸ 88
Baliani, Jean-Baptiste ▸ 132
balistique ▸ 154, 298
baquet de Mesmer ▸ 180
Baran, Paul ▸ 326
Barberini, Maffeo ▸ 121
barbiers-chirurgiens ▸ 110
Bardeen, John ▸ 302
baromètre ▸ 132, 136
base 10 ▸ 123
base 60 ▸ 16
bataille d'Ypres ▸ 271
Batelli, Frédéric ▸ 207
Bateson, William ▸ 232
bâtonnets de Napier ▸ 123
Bauer, Georg ▸ 116
Beauvais, Pierre de ▸ 47
Beck, Claude Schaeffer ▸ 207
Becquerel, Henri ▸ 262
berceau de l'humanité ▸ 316
Bergman Torbern ▸ 185
Berkeley ▸ 282
Berlin ▸ 154, 202-203, 250
Bernard, Claude ▸ **234**
Berne ▸ 266
Berthollet, Claude-Louis ▸ 185
bestiaire ▸ 46
Bi Cheng ▸ 93
Bible ▸ 46, **92**, 216
bibliothèque d'Alexandrie ▸ 33, 49
bibliothèque d'Assourbanipal ▸ 57
Bibliothèque nationale de France ▸ 76
big bang ▸ 277, 280, 352
big science ▸ 283
Bingen, Hildegarde de ▸ **72**
biologie ▸ 192, 322, 232
biométrie ▸ 218
Biot, Jean-Baptiste ▸ 208
biotechnologie ▸ 348
bipédie ▸ 316
Biringuccio, Vannoccio ▸ 117

bobine de Ruhmkorff ▸ 252
Boèce ▸ 52, 99
Bohême ▸ 116
Bohr, Niels ▸ 290
Boltwood, Bertram ▸ 305
bombe à hydrogène ▸ 301
bombe atomique ▸ **300**
Bonaparte, Napoléon ▸ 195, 205
Bonpland, Aimé ▸ 192
Borel, Émile ▸ 274
boson ▸ 336
Bossut, Charles ▸ 178
Boston ▸ 320
Bougainville, comte de ▸ 152, 163
boulet de canon ▸ 154
boulier ▸ 98
Boulton, Matthew ▸ 174
Bourbaki ▸ **280**
boussole ▸ **40**, 80, 208
Boyle, Robert ▸ 28, 91, 124, 136, 166
brasseur ▸ 220
Brattain, Walter ▸ 302
Brésil ▸ 277
brevet ▸ 174, 176, 250, 266, 299, 349
Briggs, Henry ▸ 122
Bruno, Giordano ▸ 97
Buffon, Georges Louis Leclerc de ▸ 148, **152**, 217
Bunsen, Robert ▸ **226**
Bureau international des poids et mesures ▸ 187
Byron, Georges ▸ 206

C

cabinet de curiosités ▸ 134, 152
Cabinet du Roi ▸ 152
cacao ▸ 109
cadavre ▸ 114, 222
cadran solaire ▸ 54-55
cailloux ▸ 98
Cajal, Santiago Ramón y ▸ 254
Calcidius ▸ 25
calcul différentiel et intégral ▸ 146, 155, 158, 282
calcul ▸ 66, 98
calculateur ▸ 298
calendrier ▸ 20, 34, 54, **84**, 127, 298
canal du Midi ▸ 142
Canaries ▸ 108
cancer ▸ 282
cancérologie ▸ 314
Canon de la médecine ▸ 110
capitalisme ▸ 240-241
caractères mobiles ▸ 92-93
carbone 14 ▸ 304
carburant ▸ 174
carnet de croquis ▸ 76
Carnot, Sadi ▸ 220
Carson, Rachel ▸ **318**
Cartan, Henri ▸ 280
Carthage ▸ 55
cartographie génétique ▸ 272
cartographie ▸ 70, 85, 108, 151, 162
Casa de la Contratación ▸ **108**
Cassini ▸ 164-165
Cassini, César-François ▸ 151
Cassini, Giovanni Domenico ▸ 138-139, 164-165
catalogue d'étoiles ▸ **20**
catapulte ▸ 50, 94
catastrophe naturelle ▸ 44
catastrophisme ▸ 199, 216
cathédrale ▸ 76
Causae et Curae ▸ 72
ceintures de radiation de Van Allen ▸ 313
Celera Genomics ▸ 307
cellule ▸ **254**, 273, 322
Censorin ▸ 26
censure ▸ 82, 130, 156
centrale nucléaire ▸ 340
Cercle de Vienne ▸ 215
CERN ▸ 282, **336**
cerveau ▸ 26, 260
césium ▸ 226
Chain, Ernst Boris ▸ 278
chaînon manquant ▸ 316
chaleur ▸ 220, 238
champ électrique ▸ 252
champ magnétique ▸ 252, 282

champignon ▸ 278
chaos ▸ 204, 320
char d'assaut ▸ 94
charbon ▸ 175
Charcot, Jean-Martin ▸ 180
Charles III de Lorraine ▸ 118
Charles V ▸ 88
Charney, Jule ▸ 320
Charpentier, Emmanuelle ▸ **348**
chasse ▸ 78
Châtelet, Émilie du ▸ 139, **158**
Chicago ▸ 304
chien ▸ 260
chiffres arabes ▸ **66**
chiffres indiens ▸ 67
chiffres romains ▸ 66
chimérisme ▸ 315
chimie ▸ 110, 138, 184, 212, 224, 236, 262, 270
Chine ▸ 18, 40, 44, 50, 56, 84, 126, 330
Choisy, Abbé de ▸ 143
Chong, Wang ▸ 40
Choquet-Bruhat, Yvonne ▸ 139
Christ ▸ 46
Christian IV ▸ 134
chromosome ▸ 272
chronographie ▸ 55
chronologie ▸ 54
chronomètre de marine ▸ **160**, 164
chute des corps ▸ 145
Cicéron ▸ 38
circonférence de la Terre ▸ 32-33
circuit intégré ▸ 302, 333
circulation sanguine ▸ **128**
ciseau génétique ▸ 348
Cité des dames ▸ 141
classification ▸ 148, 201, 236
climat ▸ 258
CNRS ▸ 274
Code d'Hammourabi ▸ 55-56
code génétique ▸ 307
cœur ▸ 128
col de cygne ▸ 228
Colbert, Jean-Baptiste ▸ 138, 164
collection ▸ 152
Colliget ▸ 74
Colomb, Christophe ▸ 85, 106
colonisation ▸ 106, 108, 162
colorant chimique ▸ **224**
combustible ▸ 271
combustion ▸ 184
commerce ▸ 16, 18, 108, 301, 310
compagnie Bell ▸ 302
Comte, Auguste ▸ **214**
condensateur ▸ 174
Condorcet, Nicolas de ▸ 178
conducteur ▸ 302
Congrès international de mathématiques ▸ 265
conquête spatiale ▸ 312, 328
Conseil international des unions scientifiques ▸ 312
Conseil royal ▸ 118
Consejo de Indias ▸ 108
conservation des cadavres ▸ 115
Constantinople ▸ 97
constellation ▸ 20
contraception ▸ 308
controverse ▸ 115, 120, 150-151, 133, 147, 150, 159, 167, 183, 194, 228, 291, 301, 318, 341, 348, 354-355
convection ▸ 324
Convention de Stockholm ▸ 318
Cook, James ▸ 149, 160, **162**
Copenhague ▸ 208
Copernic, Nicolas ▸ **112**, 122, 120, 130
Coppens, Yves ▸ 316
corps humain ▸ 24, 56-57, 111, 114-115, 234, 328, 355
Corpus hippocraticum ▸ 25, 55-56
Cortès, Hernan ▸ 106
cosmos ▸ 22, 34, 52, 112, 131, 166, 193
coton ▸ 176
couche géologique ▸ 216
Coulomb, Charles-Augustin ▸ **182**
coupe histologique ▸ 254
courant électrique ▸ 182, 208
courbe de Gauss ▸ 196
courriel ▸ 326
Cours de l'École normale ▸ 123

Cours de philosophie positive ▸ 214
créationnisme ▸ 200, 230
Crick, Francis ▸ 306
crise biologique ▸ 198
CRISPR ▸ **348**
cristallographie ▸ 307
croisades ▸ 96
croisement ▸ 232, 272
Crotone, Hippon de ▸ **26**
croûte terrestre ▸ 324
croyance ▸ 21, 24, 52, 54, 78, 128, 135
Cube ▸ 51
Curie, Irène ▸ 282
Curie, Marie ▸ 139, **262**, 275
Curie, Pierre ▸ **262**
Curiosity ▸ 305
Cuvier, Georges ▸ **198**, 200
cybernétique ▸ 352, 354
cycle reproductif ▸ 309
cyclotron ▸ **282**

D

Danemark ▸ 134
Darwin, Charles ▸ **230**, 288, 306, 316, 322
darwinisme social ▸ 231, 288
datation ▸ 304
Daubenton, Louis ▸ 152
Dausset, Jean ▸ 314
Davy, Humphry ▸ 195
DDT ▸ 318
De animalibus ▸ 79
De Architectura ▸ 36
De humani corporis fabrica ▸ 114
De l'histoire naturelle des Indes ▸ 108
De la pyrotechnie ▸ 117
De re metallica ▸ 116
De revolutionibus ▸ 112
décharge électrique ▸ 166
DeepMind ▸ 350
défibrillation ▸ 207
Delambre, Jean-Baptiste ▸ 187
Démocrite ▸ 13, **28**, 91, 136
démonstration ▸ 30, 103, 128, 144, 285, 320, 324
Denis, Jean-Baptiste ▸ 129
Des révolutions des orbes célestes ▸ 112
Descartes, René ▸ 68, 86, **130**, 150, 221
désintégration artificielle ▸ 282
déterminisme ▸ 204
deuxième problème de Hilbert ▸ 265
diabète ▸ 309
diagnostic ▸ 75
Dialogue sur les deux systèmes du monde ▸ 121
diaphragme ▸ 114
Dickens, Charles ▸ 177
Diderot, Denis ▸ 156
Dieu ▸ 52, 68, 72, 82, 86, 89, 98, 131, 133, 137, 153, 288
Dieudonné, Jean ▸ 280
dieux ▸ 22, 28
digestion ▸ 234, 260
Diophante ▸ 98-99
dioptrique ▸ 130
dioxyde de carbone ▸ 313, 342, 258
Discussions de pinceau depuis un petit ruisseau de rêve ▸ 41
Disquitiones arithmeticae ▸ 197
dissection ▸ 24, 114, 234
distance ▸ 32
Dobzhansky, Theodosius ▸ 288-289
domestication ▸ 18, 153
donneur ▸ 315
dorsale ▸ 313, 324
double hélice ▸ 306
Doudna, Jennifer ▸ **348**
Dracula ▸ 206
drosophile ▸ 272
Du jour natal ▸ 26
Du sens et des sensibles ▸ 24
Du, Ding ▸ 41
duplication du cube ▸ 51
dynastie des Abbassides ▸ 96
dynastie des Han ▸ 40
dynastie des Han ▸ 44
dynastie des Tang ▸ 41
dynastie Yuan ▸ 84

E

E = mc² ▸ 266
eau ▸ 132
échange colombien ▸ 106
échec ▸ 350
Eckert, John ▸ 298
éclairage électrique ▸ 250
éclipse ▸ 84, 276
école de médecine ▸ 24
École de pharmacie de l'université de Giessen ▸ 212
École de physique et de chimie industrielles ▸ 262
École des traducteurs de Tolède ▸ 96-97
École normale supérieure ▸ 202
École polytechnique de Zurich ▸ 266
École polytechnique ▸ 188, 202, 214
école ▸ 17
écologie ▸ 192, 318
économie ▸ **282**
écriture ▸ 16, 20
Eddington, Arthur ▸ **276**
Edison, Thomas Alva ▸ **250**
EDSAC ▸ 298-299
effet de serre ▸ 258
effet Joule ▸ 220
effet photoélectrique ▸ 1905
effet placebo ▸ 180
Église ▸ 112, 120
Égypte ▸ 32, 42, 48, 68
Einstein, Albert ▸ **266**, **276**, 282, 290, 300, 337
électricité ▸ 182, 194, 207, 208, 256, 340
électrodynamique ▸ 208
électrolyse ▸ 194
électronique ▸ 332
électrostatique ▸ 182, 209
élément chimique ▸ 226, 236
élément radioactif ▸ 282
Éléments de mathématique ▸ 284
éléments radioactifs ▸ 306
Éléments ▸ 30, 127
élevage ▸ 18
embryologie ▸ 27
embryon ▸ 26
empereur ▸ 126
Empire aztèque ▸ 106
Empire inca ▸ 106
Empire romain ▸ 38
ENCCRE ▸ 157
encre ▸ 92
encyclopédie ▸ 38, 43, 52, 72, 74, 116, 346
Encyclopédie ▸ **156**, 178
énergie ▸ 220, **238**, 266, 290
énergie cinétique ▸ 159
engrais chimique ▸ 270
ENIAC ▸ 298
enseignement ▸ 48, 202
entropie ▸ 238-239
environnement ▸ 193
épicentre ▸ 44
Épicure ▸ 90
épicycles ▸ 43
épidémie ▸ 106, 138
épigénétique ▸ 201
épigénistes ▸ 27
épistémologie ▸ 215
Épitaphe à l'intention d'Isaac Newton ▸ 144
équation ▸ 64, 144, 154, 252-253
équilibre de Nash ▸ 283
équivalent mécanique de la chaleur ▸ 220
Ératosthène ▸ **32**
Ercker, Lazarus ▸ 117
Errard, Jean ▸ 118
erreur ▸ 160, 196
espace ▸ 22, 266, 354
Espagne ▸ 52, 66, 108, 164, **254**
espèce ▸ 148, 200, 230
essai nucléaire ▸ 300
Essai philosophique sur les probabilités ▸ 204
étalon ▸ 186
États-Unis ▸ 211, 248, 280, 282, 308, 298, 310, 312, 318, 326
Éthiopie ▸ 317
éthique ▸ 307, 354
ethnographie ▸ 134
ethnologie ▸ 163
éthologie ▸ 339

étoile ▸ 20, 34, 276, 280
être vivant ▸ 304, 322
Étymologies ▸ 52
eucaryote ▸ 322
Euclide ▸ **30**, 68, 76, 98, 118, 127, 188, 264,280
Eugène, Dubois ▸ 316
Euler, Leonhard ▸ **154**, 269
Europe ▸ 76, **92**, 116, 205, 248, 336
évolution ▸ 200, 230, **288**, 322
évolutionnisme ▸ 199, 230
exobiologie ▸ 344
exoplanète ▸ 344
expansion ▸ 280
expédition ▸ 109, 148, 150, 152, 162, 230,
expérimentation animale ▸ 261
expérimentation ▸ 68, 80, 86, 136, 138, 234
exploration ▸ 160
explosif ▸ 270
exposition universelle ▸ 240-241
extraterrestre ▸ 335, 344
ex-Yougoslavie ▸ 314

F

faculté de sciences ▸ 263
faculté des Arts de Paris ▸ 82
Faraday, Michael ▸ 252
fauconnerie ▸ **78**
fax ▸ 311
féminisme ▸ 48, 308
femmes de sciences ▸ 48, 72, 138-139, 140-141, 158-159, 185, 188-189, 262-263, 338-339
fertilité ▸ 308
Fibonacci, Leonardo ▸ 66, 78, 98
fièvre puerpérale ▸ 222
First Draft of a Report on the EDVAC ▸ 298
fission nucléaire ▸ 300
fixisme ▸ 200
Fleming, Alexander ▸ **278**
Florence ▸ 120
Florey, Howard Walter ▸ 278
fluide ▸ 128, 184, 208, 220, 234, 238, 256, 267, 268-269
fluide magnétique ▸ 180
fluorescence ▸ 256
Flyer ▸ 268
foi ▸ 83
Fondation Curie ▸ 314
Fondation Worcester ▸ 308
fontainiers ▸ 132
Fontenelle, Bernard Le Bovier de ▸ 130
force de gravitation ▸ 145
force vitale ▸ 234
Ford, Henry ▸ 211
Fortification démontrée et réduite en art ▸ 118
fortification ▸ **118**
Fossey, Dian ▸ **338**
fossile ▸ 198, 317
Fourcroy, Antoine François ▸ 152, 185
Fragonard, Honoré ▸ 115
France ▸ 82, 88, 138, 152, 158, 178, 182, 308
Frankenstein ▸ **206**
Franklin, Benjamin ▸ 180, 183
Franklin, Rosalin ▸ **306**
Frédéric II ▸ **78**, 154
Freeth, Tony ▸ 35
Freiberg, Thierry de ▸ 86
fret maritime ▸ 310
Freud, Sigmund ▸ 180
Froissart, Jean ▸ **88**
Fukushima ▸ 340
Fulda ▸ 90
fusil ▸ 210
fusion nucléaire ▸ 300
Fust Johann ▸ **92**

G

galaxie ▸ 280
Galien, Claude ▸ 38, 55, 96, 110, 114, 116, 128
Galilée ▸ **120**, 126, 130, 132, 164
gallium ▸ 236
Galton, Francis ▸ 197, 219, 231
Galvani, Luigi ▸ 194, 207
garrot ▸ 128

Gassendi, Pierre ▸ 138
Gauss, Carl Friedrich ▸ 188, **196**, 218
gaz ▸ 135, 226, 175, 258, 342
gaz de combat ▸ 274
gaz nobles ▸ 237
gazomètre ▸ 184
gène ▸ 272, 348, 307
générateur électrostatique ▸ 166-167
génération spontanée ▸ **228**
génétique ▸ 232, 288, 348
génie militaire ▸ 118
génome humain ▸ 233, 307, 348
genre ▸ 148
géocentrisme ▸ 112
Géographie ▸ 43, 70, 97
géographie ▸ 32, 70, 137, 192
géologie ▸ 216
géométrie euclidienne ▸ 118
géométrie ▸ 30, 32, 48, 76-77, 130, 155
géophysique ▸ 304, **312**, 324
géopolitique ▸ 300
Germain, Sophie ▸ **188**
germanium ▸ 236, 302
germe ▸ 228
GIEC ▸ **342**
Giessen ▸ 212
glaciation ▸ 258
gnomon ▸ 54-55
go, jeu de ▸ 350
Gödel, Kurt ▸ 265, 282
Goldstine, Herman ▸ 298
Golgi, Camillo ▸ 254
Gongliang, Zeng ▸ 41
Goodenough, John ▸ 195
Google ▸ 350
gorges d'Olduvai ▸ 316
gorille ▸ 338
goudron ▸ 224
GPS ▸ 313
Antarctique ▸ 312
Graham, George ▸ 160
Grand Schisme ▸ 90
gravitation ▸ 144, 158
Grèce ▸ 34, 50
Greffe ▸ **314**
grenouille ▸ 194
Gribeauval, Jean-Baptiste de ▸ 211
Griffith, Frederick ▸ 306
grippe ▸ 191
Grosseteste, Robert ▸ 87
groupe sanguin ▸ 129
Groves, Leslie R. ▸ 300
Guangqui, Xu ▸ 127
Guericke, Otto von ▸ 136
guérison ▸ 180
guerre de Sécession ▸ 211
guerre du Vietnam ▸ 310
Guerre froide ▸ 312
guerre ▸ 50, **94**, **274**
Guillaume, Jacquette ▸ 141
Gutenberg ▸ **92**

H

H4 ▸ 160
Haber, Fritz ▸ **270**
Haeckel, Ernst ▸ 193, 288
Haïti ▸ 308
Hall, John ▸ **210**
Halley, Edmond ▸ 144, 160, 216
Harpers Ferry ▸ 210
Harrison, John ▸ **160**, 164
Harry Potter ▸ 47
Harvey, William ▸ **128**
hasard ▸ 204, 290, 320
Hassabis, Demis ▸ 350
héliocentrisme ▸ 112
hémisphère sud ▸ 162
Henri de Montmort ▸ 138
Henri IV ▸ 118
Herbier national du Muséum national d'histoire naturelle de Paris ▸ 149
hérédité ▸ 201, **232**, 272, 288, 306
Hermann von Helmholtz ▸ 221
Hernández, Francisco ▸ 108-109
Héron ▸ 35
Herschel, William ▸ 226
Hertz, Heinrich ▸ **252**
Hess, Harry Hammond ▸ 324

Hilbert, David ▸ **264**, 282
Hildegarde de Bingen ▸ **72**
Hipparque ▸ 34
Hippocrate ▸ 24, 26, 55, 72, 96, 129
Hiroshima ▸ 301
Hispaniola ▸ 106
Histoire des animaux ▸ 27
Histoire ecclésiastique ▸ 48
Histoire naturelle ▸ 38, 152
Hobbes, Thomas ▸ 166-167
Hoffmann, August von ▸ 224
homéopathie ▸ 181
hominidés ▸ 316
homme de Java ▸ 316
Homo ergaster ▸ 317
Homo habilis ▸ 317
Honnecourt, Villard de ▸ **76**
Hooke, Robert ▸ 124, 136, 255
Hôpital, Guillaume de l' ▸ **146**
horloge ▸ 39, 54, **88**, 131, 160, 164
***Horloge amoureux*, L'** ▸ 88
hormone ▸ 308
Hubble, Edwin ▸ **280**
humanité ▸ 316
Humboldt, Alexander von ▸ 202, 212, **192**
Humboldt, Wilhelm von ▸ **202**
humeur ▸ 55, 72, 110
Hutton, James ▸ 216
Huygens, Christian ▸ 164-165
hybride ▸ 232
hydropathie ▸ 181
hygiène ▸ 72, 222
Hypatie d'Alexandrie ▸ **48**
hypnose ▸ 180

I

iatrochimie ▸ 110
Ideal-X ▸ 311
IIIe République ▸ 189
immunogénétique ▸ 315
immunologie ▸ 191
impératrice Eugénie ▸ 225
Imprimerie ▸ 92
Incas ▸ 106
Inde ▸ 56
Indes ▸ 108
induction ▸ 124
industrie automobile ▸ 211
industrie chimique ▸ 270
infini ▸ 264
infiniment petits ▸ 146-147
informatique ▸ 320, 352, 354
ingénieur ▸ 50, 94, 118
innovation ▸ 50
Inquisition ▸ 120, 130
insecte nuisible ▸ 318
INSERM ▸ 315
Instauratio Magna ▸ 124
Institut d'études nucléaires ▸ 304
Institut Pasteur ▸ 229
institution scientifique ▸ 108
Institutions de physique ▸ 159
instrument de mesure ▸ 44, 136, **166**, 304
intelligence artificielle ▸ 350, 354
Intelsat ▸ 313
interférences ▸ 252
Internet ▸ 311, **326**, 333, 346
interprétation de Copenhague ▸ 290-291
Introduction à l'étude de la médecine expérimentale ▸ 234
invariant ▸ 221
inventeur ▸ 210, 250, 274
Irak ▸ 68
irradiation ▸ 314
Isidore de Séville ▸ **52**
isotope ▸ 304
Italie ▸ 24, 36, 80, 94, 120, 130, 194
Iwadare, Kunihiko ▸ 248

J

Jacques Ier ▸ 124
Jammet, Henri ▸ 314
Japon ▸ 248, 300
Jardin des plantes ▸ 262
Jardin du roi ▸ 152
Jean de Thessalonique ▸ 50

Jenner, Edward ▸ 190
Jersey ▸ 301
jésuites ▸ 126-127, 156, 277
Jésus-Christ ▸ 305
Jobs, Steve ▸ 332
Johanson, Donald ▸ 317
Joliot, Frédéric ▸ 282
Joules, James ▸ **220**, 238
Jules César ▸ 37
Jungner, Waldemar ▸ 195
Jupiter ▸ 120, 334
Jussieu, Antoine Laurent de ▸ 152

K

kabbale ▸ 111
Kennedy, John Fitzgerald ▸ 328
Kepler, Johannes ▸ 68, 122, 144
kilogramme ▸ 187
Kirchhoff, Gustav ▸ **226**
Kitab al-kulliyat ▸ 74
Koch, Robert ▸ 222, 229
Korolev, Sergueï ▸ **312**
Kovalevskaïa, Sofia ▸ 189
Kubilay khan ▸ **84**
Kuo, Shen ▸ 41

L

L'Anatomie du mouvement du cœur et du sang chez les animaux ▸ 126-127
La Charrue ▸ 20
La Chymie facile et charitable en faveur des dames ▸ 138
La Condamine, Charles Marie de ▸ 150
La Fabrique du corps humain ▸ 114
La Filiation de l'homme ▸ 316
La Génétique et l'origine des espèces ▸ 288
La Géométrie et pratique générale d'icelle ▸ 119
La Méridienne vérifiée ▸ 150
La Merveilleuse Règle des logarithmes ▸ 122
La Nouvelle Atlantide ▸ 125
La Richesse des Nations ▸ 179
La Situation de la classe laborieuse en Angleterre ▸ 177
Laïka ▸ 312
Lamarck, Jean-Baptiste de ▸ **200**, 230
Laon ▸ 77
Laplace, Pierre-Simon ▸ 123, 196, **204**, 218, 321
Laponie ▸ 150
Laue, Max von ▸ 257
Lavoisier, Antoine-Laurent ▸ 180, 184, 220, 236
Lawrence, Ernest ▸ **282**
Le Devisement du monde ▸ 85
Le Livre des machines de guerre ▸ 51
Le Messager céleste ▸ 120
Leakey, Louis et Marie ▸ **316**, 338
Legendre, Adrien Marie ▸ 196
Leibniz, Gottfried Wilhelm ▸ 146
Leizu ▸ 18
Les Amours ▸ 90
Les Animaux fantastiques ▸ 47
Les Épidémies au Mexique ▸ 106
Les Fondements de la géométrie ▸ 264
Les Miracles de saint Démétrius ▸ 50
Les Temps difficiles ▸ 177
lettre sur l'aimant ▸ 80
Lettres à une princesse d'Allemagne ▸ 155
Lettres philosophiques ▸ 150
Lettres sur la botanique ▸ 149
leucémie ▸ 314
Leucippe ▸ 28, 91
Lévi-Strauss, Claude ▸ 281
Libby, Willard Frank ▸ **304**
licorne ▸ 134
Liebig, Justus ▸ **212**
Linné, Carl von ▸ **148**
lion ▸ 46
livre technique ▸ 117
Löfling, Pehr ▸ 149
logarithme ▸ **122**
loi Comstock ▸ 308
loi des gaz ▸ 135
loi normale ▸ 218
lois de la réflexion ▸ 68

lois de Newton ▸ 144-145
Londres ▸ 124, 224
Longitude Act ▸ 160
longitude ▸ 138, 160, **164**
Lorenz, Edward ▸ **320**, 339
L'Origine des espèces ▸ 230
Louis XIII ▸ 152
Louis XIV ▸ 138, 142
Louis XVI ▸ 178
Lucera ▸ 80
Lucrèce ▸ 28, **90**
Lucy ▸ 316
lumière ▸ 68, 86, 226, 266, 276, 290
Lune ▸ 120, **328**
lunette astronomique ▸ 120, **126**, 164, 166
Lyell, sir Charles ▸ 216

M

machine à vapeur ▸ **174**, 238
machine d'Anticythère ▸ **34**
machine de guerre ▸ 94
Machine de Marly ▸ **142**
machine pneumatique ▸ **136**, 166
magie naturelle ▸ 111
magnétisme animal ▸ **180**
magnétisme terrestre ▸ 197
magnétisme ▸ 40, 45, 80, 182, 194, 208
Mairan, Dortous de ▸ 159
maïs ▸ 109
maison de la sagesse ▸ 64
Maison du commerce ▸ 108
malaria ▸ 224
Malpighi, Marcello ▸ 129
Manchester ▸ 176
Manchester Mark I ▸ 299
manipulation génétique ▸ 348
Marco Polo ▸ 85
Marconi, Guglielmo ▸ 252
marées ▸ 144
Margulis, Lynn ▸ **322**
Maricourt, Pierre Pèlerin de ▸ **80**
Martinet, François-Nicolas ▸ 153
Marx, Karl ▸ 177, 240
masse ▸ 266
matérialisme ▸ 29, 212
maternité ▸ 222
Mathé, George ▸ **314**
mathématique ▸ 16, 30, 42, 51, 54, 64, 66, 119, 122, 144, 146, 154-155, 188, 196, 204, 264, 268, 280, 320
matière ▸ 28
Mauchly, John ▸ 298
Maupertuis, Pierre-Louis Moreau de ▸ 150, 154
Mauriès, Patrick ▸ 135
mauvéine ▸ 224
Maxwell, James Clerck ▸ 252, 337
Mayence ▸ 92
Mayer, Julius Robert von ▸ 220
McCormick, Katharine ▸ 308
McLean, Malcolm ▸ **310**
mécanique ▸ 36, 88, 144
mécanique des fluides ▸ 146, 155, 268
mécanique des solides ▸ 146, 155
mécanique quantique ▸ 226, 290-291
Méchain, Pierre ▸ 187
médaille Fields ▸ 189
médecine alternative ▸ 181
médecine ▸ 24, **55**, 72, 74, 72, 110, 116, 134, 180, 181, 190, 234, 254, 256, 262, 274, 278, 282, 330, 354
médicament ▸ 330
mémoire interne ▸ 298
Mémoires pour servir à l'histoire de Louis XIV ▸ 143
Mendel, Gregor ▸ **232**, 272
Mendeleïev, Dimitri ▸ **236**
Menlo Park ▸ 250
mercure ▸ 132
méridien ▸ 32, 164, 186
Mesmer, Franz Anton ▸ **180**
Mésopotamie ▸ 12-13, 16, 19, 20
messages secrets ▸ 352
mesure ▸ 32, 151, 183, 196
mesure du temps ▸ 39
métaux ▸ 116
météorologie ▸ 130, 258, 320

Météorologiques ▸ 69
méthode des différences ▸ 146
méthode des moindres carrés ▸ 196, 204
méthode inductive ▸ 124
métier à filer ▸ 18, **176**
métier à tisser ▸
mètre ▸ **186**
Meurdrac, Marie ▸ **140**
Mexique ▸ 106, 309
Meyer, Julius Lothar ▸ 236
microbe ▸ 222
microbiologie ▸ 228
micro-organisme ▸ 228
microprocesseur ▸ 303
microscope ▸ 166, **254**, 273
Milan ▸ 94
Milan, duc de ▸ 94
Milet ▸ 22
milieu interstellaire ▸ 334
mine ▸ 116
ministère de la Défense ▸ 326
Mirzakhani, Maryam ▸ 189
missile ▸ 312
mission Apollo ▸ 328
missionnaire ▸ 126
mitrailleuse ▸ 94
mode ▸ 224
modèle animal ▸ 273
modélisation ▸ 342, 352
moelle osseuse ▸ 314
moine copiste ▸ 90
moisissure ▸ 278
monastère ▸ 90
mondialisation ▸ 311
Moore School of Electrical Engineering ▸ 298
morale ▸ 46
Morgan, Thomas ▸ **272**, 288
Morgenstern, Oskar ▸ **282**
Morse ▸ 253
MOSFT ▸ 302
mouche du vinaigre ▸ 272
moustique ▸ 330
mouvement perpétuel ▸ 76, 80
MUL.APIN ▸ 20-21
multiplication ▸ 16, 122
Mundaneum ▸ 346
mûrier ▸ 18
Muséum national d'histoire naturelle ▸ 200
Museum Wormianum ▸ 134
musique ▸ 48
mutation ▸ 288-289
mythologie ▸ 22

N

Nagasaki ▸ 301
Napier, John ▸ **122**
narval ▸ 134
NASA ▸ 281, 312, 328, 334
Nash, John ▸ 283
Naturphilosophie ▸ 209
naufrage ▸ 34
navigation ▸ 40, 108, 162
néolithique ▸ 16
Neptune ▸ 334
nerf ▸ 24, 114, 254
Neumann, John von ▸ **298**, 352, 282
neurobiologie ▸ **254**
neurone ▸ **254**, 260, 282, 350
New Experiments Physico-Mechanical Touching the Spring of the Air and its Effects ▸ 134
New Jersey ▸ 250
New York ▸ 250, 285
Newcomen, Thomas ▸ 174
Newton, Sir Isaac ▸ 28, 86, **144**, 146, 150, 158, 182, 188, 204, 215
Nîmes ▸ 37
Nippur ▸ 17
nitrate ▸ 270
Nobel, Alfred ▸ 256
Noether, Emmy ▸ 189
Nollet, Jean Antoine ▸ 183
nombre ▸ 16, 31, 66, **98-99**
nomenclature chimique ▸ 184
Nouveau Monde ▸ 106
Nouveau-Mexique ▸ 300
noyau ▸ 282
Noyce, Robert ▸ 303

nucléaire ▸ 304, 354
nucléotide ▸ 307
numération ▸ 16, 66, 98-99

O

observation astronomique ▸ 42, 84
Observatoire de Bruxelles ▸ 218
Observatoire de Paris ▸ 214
Observatoire royal ▸ 138
obstétrique ▸ 222
Occident ▸ 66, 72, 248
œil ▸ 24, 68
Œrsted, Hans Christian ▸ 182, 194, **208**
OGM ▸ 233
onde hertzienne ▸ 252
onde radio ▸ 252
Oppenheimer, Robert ▸ **300**
optique ▸ 68, 86, 126
ordinateur ▸ 248, **298**, 326, **332**, **352**
organe ▸ 25, 198, 234
Organisation européenne de recherche du traitement du cancer ▸ 315
Organisation météorologique mondiale ▸ 259
Organisation mondiale de la santé ▸ 279
organisme modèle ▸ 273
Orient ▸ 60, 96, 127, 248
ornithologie ▸ 78
Orologe amoureus ▸ 88
Oudin, Jacques ▸ 191
Ovando, Juan de ▸ 108
Ovide ▸ 90
Oxford ▸ 87
oxydation ▸ 184

P

Pacifique ▸ 162
Padoue ▸ 114
Painlevé, Paul ▸ 268, 274
paléoanthropologie ▸ 316
paléontologie ▸ 198
paludisme ▸ 224, 318, **330**
Pangée ▸ 324
pangenèse ▸ 306
pape ▸ 60
papier ▸ 96
papyrus ▸ 49
Paracelse ▸ **110**, 138
parasite ▸ 330
Paris ▸ 87, 262
particule élémentaire ▸ 336
Pascal, Blaise ▸ 133
Pasteur, Louis ▸ 190, 222-223, **228**
Paul III ▸ 113
Paulze, Marie-Anne Pierrette ▸ 185
Pavlov, Ivan Petrovitch ▸ **260**
paysage ▸ 192
Pékin ▸ 127
pénicilline ▸ **278**
Penneylvanie ▸ 298
Perey, Marguerite ▸ 139
Perkin, William ▸ **224**
Pérou ▸ 116, 150, 11
Perouse, La ▸ 163
Perrault, Claude ▸ 139
Perrier, Florin ▸ 133
Perrin, Jean ▸ 28
Perry, Matthew ▸ 248
pesticide ▸ 318
petit pois ▸ 232
pharaon ▸ 304
pharmacologie ▸ 25
Philon de Byzance ▸ 51
Philosophie zoologique ▸ 200
philosophie ▸ 22, 48, 56, 68, 74, 75, 82, 86, 90, 96, 124, 130, 166, 214
phonographe ▸ 250
photon ▸ 290-291
Physica ▸ 72
physiocrates ▸ 178-179
physiologie ▸ 234
Physiologus ▸ **46**
physique quantique ▸ **290**
physique sociale ▸ **218**
physique ▸ 28, 130, 136, 144, 256, 262, 266, 336
phytothérapie ▸ 72

Pic de La Mirandole, Jean ▸ 111
pile atomique ▸ 300
pile électrique ▸ **194**, 208
pilule contraceptive ▸ **308**
Pincus, Gregory ▸ 308
Pisan, Christine de ▸ 141
pithécanthrope ▸ 316
Planche de Galton ▸ 197
Planck, Max ▸ 290-291
planète ▸ 34, 42, 144, 344, 328
planisphère ▸ 70
Planté, Gaston ▸ 193
plantes ▸ 72
plasma germinatif ▸ 306
Platon ▸ 25, 48, 54
Playfair, John ▸ 30
Pline l'Ancien ▸ **38**
Pneumatiques ▸ 35
poésie ▸ 88, 90
Pogge, le ▸ **90**
Poincaré, Henri ▸ 264
pôle ▸ 80
Polidori, John William ▸ 206
polonium ▸ 262
pomme de terre ▸ 109
pompe ▸ 117, 132, 142,
Pont du Gard ▸ 36-37
pont ▸ 36
Pope, Alexander ▸ 144
Popper, Karl ▸ 22
porte-conteneurs ▸ 311
Porter, Rodney ▸ 191
Porto Rico ▸ 308
Portugal ▸ 164-165
positivisme ▸ 215
positron ▸ 282
post-humanisme ▸ 354-355
postulat des parallèles ▸ 30
potassium radioactif ▸ 316
Pouchet, Félix Archimède ▸ 228
poudre à canon ▸ 80
poumon ▸ 128
précision ▸ 32, 151, 183, 196
préformationistes ▸ 27
Première Guerre mondiale ▸ 270, 274, 280
présage ▸ 20
presse ▸ **92**
pression atmosphérique ▸ 132
Prévost, Jean-Louis ▸ 207
Priestley, Joseph ▸ 184
primate ▸ 338
primatologue ▸ 338
principe actif ▸ 330
Principes de géologie ▸ 216
Principes de la philosophie ▸ 130
Principes généraux de la médecine ▸ 74
Principes généraux des classiques de la guerre ▸ 40-41
Principia ▸ 130, 144, 158
Printemps silencieux ▸ 318
prix Nobel ▸ 249, 256, 262, 266, 271, 283, 302, 304, 330, 339,
probabilités ▸ 204, 218, 290
procédé Haber-Bosch ▸ **270**
production de masse ▸ 210
produits de beauté ▸ 140
progestérone ▸ 308-309
programme informatique ▸ 350
projet Manhattan ▸ 283, 300, 304
protocole de Kyoto ▸ 342
protocole de Montréal ▸ 342
psychologie ▸ 261
Ptolémée IV ▸ 33
Ptolémée, Claude ▸ **42**, 68, 70, 74, 112, 162
public ▸ **240-241**
puissances de 10 ▸ 123
pulsar ▸ **344**
puy de Dôme ▸ 133
Pythagore ▸ 98

Q

quadrivium ▸ 48
quanta ▸ 266, 290-291
querelle du vide ▸ 133
Quesnay, François ▸ 179
Quételet, Adolphe ▸ 218
quinine ▸ 224
quotient intellectuel ▸ 218

R

radiation ▸ 256, 262
Radiation Laboratory ▸ 282
radio ▸ 253, 302
radioactivité ▸ 216, **262**, **304**, 316, 340, 256, 275
radium ▸ 262
rapaces ▸ 78
rayonnement fossile ▸ 277
rayons cathodiques ▸ 256
rayons X ▸ **256**, 262
réacteur nucléaire ▸ 300, 314, 340
réaction du greffon contre l'hôte ▸ 314
réanimation ▸ 207
recensement ▸ 218
réchauffement climatique ▸ **258**, 342
recherche industrielle ▸ 250
Recherches sur des hybrides végétaux ▸ 232
réduction en art ▸ 119
réductionnisme ▸ 260
réflexe conditionné ▸ 260
réflexe de Pavlov ▸ 260
Réflexions sur la formation et la distribution des richesses ▸ 179
Réforme ▸ 110
Reinhold, Érasme ▸ 122
relativité ▸ 266, **276**
religion ▸ 28, 46, 48, 72, 82, 86, 90, 156
réponse immunitaire ▸ 191
République tchèque ▸ 232
réseau électrique ▸ 250
réseau informatique ▸ 326
Révolution française ▸ 240
révolution industrielle ▸ 174, 176, 238
révolution scientifique ▸ 124, 136
Rheticus, Georg Joachim ▸ 112
rhétorique ▸ 119
Ricci, Matteo ▸ 126
Riquet, Pierre-Paul ▸ 142
Robbins, Benjamin ▸ 154
Roberts, Lawrence ▸ 326
Roberval, Gilles de ▸ 139
roi de Prusse ▸ 154
roi des animaux ▸ 47
Röntgen, Wilhelm ▸ **256**
Roosevelt, Franklin ▸ 267
roue dentée ▸ 95
Rousseau, Jean-Jacques ▸ 149
route de la soie ▸ 18
Royal Astronomical Society ▸ 276
Royal College of Chemistry ▸ 212, 224
Royal Society ▸ 138
Ruowang, Tang ▸ 126
Russie ▸ 154, 236, 328, 340
Rutherford, Ernest ▸ 305
Rwanda ▸ 338

S

sacré ▸ 55
saignée ▸ 129
saint Augustin ▸ 46
Saint-Domingue ▸ 106
sainte ▸ 72
Saint-Hilaire, Geoffroy ▸ 198
Saint-Simon, Henri de ▸ 214
sang ▸ 314
Sanger, Margaret ▸ **308**
satellite ▸ 312, 328
Saturne ▸ 42, 334
Schall von Bell, Johann Adam ▸ 126
Schleiermacher, Friedrich ▸ 202
Schockley, William ▸ 302
Schreck, Johann ▸ 126
Science ▸ 304
science économique ▸ 178
science-fiction ▸ 206
sciences naturelles ▸ 38, 79, 134, 152
Scot, Michael ▸ 78
scribe ▸ 16
seconde) ▸ 187
Seconde Guerre mondiale ▸ 278, 298, 300, 304, 352, 354
sédiment ▸ 216
séisme ▸ 44, 324
sélection artificielle ▸ 233
sélection naturelle ▸ 230, 288-289

sélection sexuelle ▸ 231
semence ▸ 26
semiconducteur ▸ 248, 302
Semmelweis, Ignace Philippe ▸ **222**
Sénèque ▸ 54
sériciculture ▸ 18
serious games ▸ 283
serment d'Hippocrate ▸ 25
Sève, Jacques de ▸ 153
Séville, Isidore de ▸ **52**
sexe ▸ 26, 273
Shapin, Steve ▸ 143
Shelley, Mary ▸ **206**
Shelley, Percy ▸ 206
Shou shi li ▸ 84
Sicile ▸ 70
Sidereus Nuncius ▸ 120
siècle des Lumières ▸ 145, 156, 202
siège de velours ▸ 119
siège ▸ 50, 118
silicium ▸ 302
Silicon Valley ▸ 332
simoscope ▸ 44
simples ▸ 73
Sivin, Nathan ▸ 84
Smith, Adam ▸ 179
socialisme ▸ 214
Société de physique de Stockholm ▸ 258
Société royale de Londres ▸ 124
sociologie ▸ 214
Socrate le Scholastique ▸ 48
soie ▸ 18
Solander, Daniel ▸ 149
Soleil ▸ 42, 226
Solla Price, Derek de ▸ 35
solstice ▸ 32
Somerville, Mary ▸ 189
sonar ▸ 275
sonde spatiale ▸ 334
Sorbonne ▸ 264
spécimen ▸ 152
spectre d'absorption ▸ 226
spectre d'émission ▸ 226
spectroscope ▸ 226
Spoutnik ▸ 312
squelette ▸ 198, 256
standardisation ▸ 211
Starling, Ernest H. ▸ 309
station météorologique ▸ 259
statistique ▸ 196, 218
Stockfish ▸ 350
structuralisme ▸ 280
Stupor Mundi ▸ 78
suaire de Turin ▸ 305
Sualem, Rennequin ▸ 142
Suède ▸ 258
Suisse ▸ 110
superstition ▸ 45
Sur l'organisation interne et externe des établissements scientifiques supérieurs à Berlin ▸ 203
Sylvestre II ▸ 66
symbiose ▸ 322
synapse ▸ **254**
Synthèse mathématique ▸ 42
Systema Naturae ▸ 148
système américain de production ▸ **210**
système d'histocompatibilité ▸ 314
système de mesure ▸ 186
système décimal ▸ 186
Système du monde ▸ 130
système héliocentrique ▸ 112, 120, 122
système immunitaire ▸ 106, 315
système métrique ▸ 184
système nerveux ▸ 14, 254, 260
Système solaire ▸ 130, 204, 334, 344

T

tabac ▸ 109
tableau périodique des éléments ▸ **236**
tablette d'argile ▸ **16**, 20, 55
tanker ▸ 311
Tanzanie ▸ 316
taxonomie ▸ 148
Taylor, Robert ▸ 326
Tchernobyl ▸ **340**
techniciens invisibles ▸ 143
technoscience ▸ **354**

tectonique des plaques ▸ 313, **324**
teinture ▸ 224
télécommunications ▸ 313
télégraphie ▸ 195, 250, 252
télescope James Webb ▸ 281
télescope spatial Hubble ▸ 281
télescope ▸ 280, 344
température ▸ 258, 342
Tempier, Étienne ▸ **82**
temps ▸ **54**, 88, 266,
Terre ▸ 22, 32, 112, 150, 186, 216, 258, 342, 344
Territoire ▸ 178
Texas ▸ 301
textile ▸ 224
Thalès ▸ 22
The Times ▸ 276
The World of Parmenides, Essays on the Presocratic Enlightenment ▸ 22
théologie ▸ 46, 82
Théophraste ▸ 24
théorème d'incomplétude ▸ 265
théorème de Fermat ▸ 188
Théorie analytique des probabilités ▸ 218
théorie cellulaire ▸ **254**
théorie de l'évolution ▸ **230**, 288
théorie de l'Univers ▸ 276
théorie de la relativité générale ▸ 267
théorie de la relativité restreinte ▸ 267
Théorie de la Terre ▸ 216
théorie des ensembles ▸ 264, 280
théorie des jeux ▸ 282
théorie des nombres ▸ 155
théorie quantique ▸ 302
théorie réticulaire ▸ 254
thérapie comportementale ▸ 261
thermodynamique ▸ 220, 238
think tank ▸ 283
Timée ▸ 25
Tolède ▸ 97
tomate ▸ 109
Tomomi, Iwakura ▸ 248
Torricelli, Evangelista ▸ **132**, 136
torsion ▸ 50, 182,
tourbillons de Descartes ▸ 131
Tournefort, Joseph de ▸ 139
traduction ▸ 96, 158
Traité élémentaire de chimie ▸ 184, 237
transformisme ▸ 200, 230
transfusion ▸ 129, 314
transistor ▸ **302**
transmission héréditaire ▸ 272
transport ▸ 310
travail ▸ 238-239
trébuchet à traction ▸ **50**
tremblement de terre ▸ 44
triangulation ▸ 151
trigonométrie ▸ 32, 151
Trinity ▸ 300
trou de la couche d'ozone ▸ 342
tube de Coolidge ▸ 257
tube électronique ▸ 302
tuberculose ▸ 229
Turgot, Anne Robert Jacques ▸ **178**
Turing, Allan ▸ 298, 352
typographie ▸ **92**

U

ultrason ▸ 275
uniformitarisme ▸ 216
Union soviétique ▸ 312
unités internationales ▸ 187
univers ▸ 72, 112, 277, 280
université de Bâle ▸ 110
université de Berkeley ▸ 282
université de Cambridge ▸ 299
université de Leipzig ▸ 212
université de Louvain ▸ 114
université de Manchester ▸ 299
université de Paris ▸ **82**
université de Saint-Pétersbourg ▸ 236
université Harvard ▸ 212
université médiévale de Bologne ▸ 83
uranium ▸ 262, 300
Uranus ▸ 334
Urbain VIII ▸ 121
Urey, Harold ▸ 304
Uruk ▸ 16
usine ▸ 176

V

vaccin ▸ 306
vaccination ▸ **190**, 228, 306
vache ▸ 190
vallée du Grand Rift ▸ 317
Van Leeuwenhoek, Antoni ▸ 166-167
Vanguard ▸ 312
variole ▸ 106-107
variolisation ▸ 190
Vauban, Sébastien Le Prestre de ▸ 118
veine ▸ 129
vénus hottentote ▸ 199
ver à soie ▸ **18**
Verbiest, Ferdinand ▸ 127
vérole ▸ 106
Versailles ▸ 142
vertébrés ▸ 201
Vésale, André ▸ **114**, 128
Vespucci, Amerigo ▸ 108
Vésuve ▸ 39
Viagra ▸ 279
vide ▸ 28, 36, 132, 136, 166
Vie de Monsieur Turgot ▸ 178
Vienne ▸ 222
vigne ▸ 39
ville fortifiée ▸ 50
Ville, Arnold de ▸ 142
Vinca ▸ 314
Vinci, Léonard de ▸ **94**
virus ▸ 190
vis sans fin ▸ 95
visionnaire ▸ 72
Vitruve ▸ **36**
vivisection ▸ 261
Voie lactée ▸ 126, 280
volcanisme ▸ 216, 324
Volta, Alessandro ▸ 182, **194**
Voltaire ▸ 150, 154, 158
von Neumann, John ▸ 298
voûte céleste ▸ 22
Voyager ▸ 334
vulgarisation ▸ 140, 153, 156, 204, 240-241, 318

W

Wales, Jimmy ▸ 346
Watson, James ▸ **306**
Watt, James ▸ **174**
Wegener, Alfred ▸ 324
Weide, Yang ▸ 41
Weil, André ▸ 280
Weismann, August ▸ 306
Wikipedia ▸ **346**
Wilkes, Maurice ▸ 299
Wollstonecraft, Mary ▸ 206
Wolszczan, Aleksander ▸ **344**
Worm, Ole ▸ **134**
Wozniak, Steve ▸ 332
Wright, Wilbur et Orville ▸ 268

Y, Z

Yazami, Rachid ▸ 195
Yokohama ▸ 248
Youyou, Tu ▸ **330**
Yukawa, Hideki ▸ 249
zéro ▸ 17, 98
Zhang Heng ▸ **44**

Table des illustrations

4 ph © Musée du Louvre, Dist. RMN-Grand Palais/ Christian Decamps

5 ph © British Library Board. All Rights Reserved/ Bridgeman Images

6 ph © Service historique de la Défense

7 ph © Bridgeman Images

8 ph © Lee/Leemage

9 ph © Red Huber/Orlando Sentinel/MCT via Getty Images

10-11 ph © Musée du Louvre, Dist. RMN-Grand Palais/ Christian Decamps

12 ph © Musée du Louvre, Dist. RMN-Grand Palais/ Christian Decamps

14-hd ph © Rabatti & Domingie/Akg-Images

14-bg ph © Pictures from History/Bridgeman Images

14-hg ph © Plimpton 322; Columbia University Cuneiform Collection; Box 31; Rare Book and Manuscript Library, Columbia University in the City of New York

14-bd ph © Science Source/Akg-Images

15-hg ph © Akg-Images

15-bg ph © Deagostini/Leemage

15-bm ph © SSPL/Getty Images

15-hd ph © Mappamundi, after Isidore of Seville, c.1130-1135, French School, (12th century)/ Bayerische Staatsbibliothek, Munich, Germany/De Agostini Picture Library/Bridgeman Images

15-hm ph © Akg-Images

16 ph © Plimpton 322; Columbia University Cuneiform Collection; Box 31; Rare Book and Manuscript Library, Columbia University in the City of New York

17 ph © Plimpton 322; Columbia University Cuneiform Collection; Box 31; Rare Book and Manuscript Library, Columbia University in the City of New York

19 ph © Pictures from History/Bridgeman Images

20 ph © Rabatti & Domingie/Akg-Images

21 ph © Rabatti & Domingie/Akg-Images

22 ph © PrismaArchivo/Leemage

23 ph © PrismaArchivo/Leemage

24 ph © Bibliothèque nationale de France

25 ph © Getty Images/iStockphoto

27 ph © Science Source/Akg-Images

28 ph © The Granger Collection, New York/The Granger Collection/Aurimages

29 ph © Corsin Battaglia and Philipp Aebi, Université de Neuchâtel

30 ph © Mark A. Wilson (Wilson 44691), Department of Geology, The College of Wooster/Wikimédia

31 ph © Bodleian Libraries, University of Oxford

32 ph © Bridgeman Images

33 ph © Akg-Images

34 ph © 2012 Tony Freeth, Images First Ltd

35 ph © 2012 Tony Freeth, Images First Ltd

36 ph © Bridgeman Images

37 ph © espiegle/Getty images/iStockphoto

38 Portrait de Pline l'Ancien (1859)/Domaine public/ Wikimédia

39 ph © Deagostini/Leemage

41 ph © ViewStock/Getty Images

42 Portrait de Ptolémée/Theodor de Bry (1596)/ Wikimédia/Domaine public

43 ph © Museo D'Arco Mantova

44 Portrait sur timbre de Zhang Heng/State Post bureau of the People's Republic of China/Domaine public/Wikimédia

45 ph © SSPL/Getty Images

46 ph © British Library Board. All Rights Reserved/ Bridgeman Images

47 ph © British Library Board. All Rights Reserved/ Bridgeman Images

48 ph © Akg-Images

49 ph © Akg-Images

50 ph © Photograph: Codices Electronici AG, www.e-codices.ch/Burgerbibliothek Bern

51 ph © Photograph: Codices Electronici AG, www.e-codices.ch/Burgerbibliothek Bern

52 ph © Isidore de Séville/Wikimédia/Domaine public

53 ph © Mappamundi, after Isidore of Seville, c.1130-1135, French School, (12th century)/Bayerische Staatsbibliothek, Munich, Germany/De Agostini Picture Library/Bridgeman Images

54 ph © RMN-Grand Palais (musée du Louvre)/Hervé Lewandowski

55 ph © RMN-Grand Palais (musée du Louvre)/Hervé Lewandowski

56 ph © Granger Coll NY/Aurimages

57 ph © Granger Coll NY/Aurimages

58-59 ph © British Library Board. All Rights Reserved/ Bridgeman Images

60 ph © British Library Board. All Rights Reserved/ Bridgeman Images

62-bd ph © Science Source/Akg-Images

62-bg ph © Bibliothèque nationale de France

62-h ph © Jean Soutif/LookatSciences

63-bm ph © Bibliothèque Sainte-Geneviève, Paris, cliché IRHT

63-hd ph © DeAgostini/Leemage

63-bg ph © Bibliothèque nationale de France

63-hg ph © Bibliothèque nationale de France

64 www.thoughtco.com/Domaine public

65 ph © Jean Soutif/LookatSciences

66 ph © Bridgeman Images

67-b Codex Vigilanus Primeros Numeros Arabigos/ Srnec/Wikimédia

67-h ph © Bibliothèque nationale de France

68 ph © Bridgeman Images

69 ph © Science Source/Akg-Images

70 ph © «Photothèque De Agostini/G. Dagli Orti/ Bridgeman Images»

71 ph © World History Archive/Aurimages

72 ph © Costa/Leemage

73 ph © Bridgeman Images

74 ph © Bridgeman Images

75 ph © Bridgeman Images

76 Portrait de Villard de Honnecourt (autour de 1230)/ Domaine public/Wikimédia

77 ph © Bibliothèque nationale de France

78 ph © BPK, Berlin, Dist. RMN-Grand Palais/Ruth Schacht

79 ph © Bibliothèque nationale de France

80 ph © Interfoto/Thomas Höfler/Akg-Images

81 ph © Bibliothèque nationale de France

82 ph © Akg-Images

83 ph © Akg-Images

84 Portrait de l'empereur Kublai Khan peint par Araniko (1294)/Domaine public/Wikimédia

85 ph © Imaginechina

87 ph © Bibliothèque Sainte-Geneviève, Paris, cliché IRHT

88 ph © Bridgeman Images

89 ph © Tibor Bognar/Alamy Stock Photo

90 ph © Bridgeman Images

91 ph © Erich Lessing/Akg-Images

92 Portrait de Johann Guttenberg (2004)/Domaine public/Wikimédia

93 ph © Otus/Index/Bridgeman Images

94 ph © Granger Coll NY/Aurimages

95 ph © DeAgostini/Leemage

96 ph © Bibliothèque nationale de France

97 ph © Bibliothèque nationale de France

98 ph © Bibliotheque de la Faculte de Medecine, Paris, France/Archives Charmet/Bridgeman Images

99 ph © Bibliotheque de la Faculte de Medecine, Paris, France/Archives Charmet/Bridgeman Images

100-101 ph © Service historique de la Défense

102 ph © Service historique de la Défense

104-bg ph © Bridgeman Images

104-hm ph © Bridgeman Images

104-hd ph © Bridgeman Images

104-bd ph © British Library Board/Leemage

105-m ph © MNHN

105-hd ph © Archives Charmet/Bridgeman Images

105-hg ph © Bianchetti/Leemage

105-b ph © Bibliothèque nationale de France

106 ph © GL Archive/Alamy Stock Photo

107 ph © GL Archive/Alamy Stock Photo

108 ph © Bibliothèque nationale de France

109 ph © Bibliothèque nationale de France

110 Portrait présumé de Paracelse/Domaine public/ Wikimédia

111 ph © Bridgeman Images

112 Nicolas Copernic/Musée de Turin/Domaine public/Wikimédia

113 ph © Bridgeman Images

114 ph © Bridgeman Images

115 ph © Bridgeman Images

116 ph © Bridgeman Images

117 ph © Bridgeman Images

118 ph © Portrait de Jean Erad/Caroline Léna Becker/ Wikimédia

119 ph © Bridgeman Images

120 Portrait de Galileo Galilei/Justus Sustermans/ National Maritime Museum/Domaine public/ Wikimédia

121 ph © Science Source/Akg-Images

122 ph © Aisa/Leemage

123 ph © Musée des arts et métiers-Cnam/photo studio Cnam

124 ph © MP/Leemage

125 ph © Universal History Archive/UIG/SCIENCE PHOTO LIBRARY/Akg-Images

126 ph © Bridgeman Images

127 ph © Bridgeman Images

128 ph © Lee/Leemage

129 ph © British Library Board/Leemage

130 Portrait de René Descartes/Frans Hals/Musée du Louvre/Domaine public/Wikimédia

131 ph © World History Archive/Aurimages

132 ph © Bridgeman Images

133 ph © Bianchetti/Leemage

134 ph © World History Archive/Aurimages

135 ph © Science Photo Library/Akg-Images

136 ph © Portrait de Robert Boyle/Domaine public/ Wellcolme Images/Wikimédia

137 ph © Bridgeman Images/Leemage

138 ph © Bridgeman Images

139 ph © Bridgeman Images

141 ph © Science History Institute/Wikipédia

142 ph © Château D'Ordange/Ville de Seraing

143 ph © Château de Versailles/Wikimédia

144 ph © Bridgeman Images

145 ph © Akg-Images

146 ph © Bridgeman Images

147 ph © Bibliotheque nationale de France

148 ph © Portrait de Carl von Linné par Alexander Roslin/1866: transféré au National Museum depuis le château de Gripsholm/Domaine public/Wikimédia

149 ph © MNHN

150 De Agostini Picture Library/Bridgeman Images

151 ph © www.e-rara.ch

152 ph © Portrait de Georges- Louis Leclerc, comte de Buffon, par François-Hubert Drouais/1753/Musée Buffon, Montbard/Domaine public/Wikimédia

153 ph © Christie's Images/Bridgeman Images

154 ph © Portrait de Leonhard Euler par Jakob Emanuel Handmann/1753/Kunstmuseum Basel/ Domaine public/Wikimédia

155 ph © Paris – Musée de l'Armée, Dist. RMN-Grand Palais/Tony Querrec

156 ph © Portrait de Jean le Rond d'Alembert/ Bonhams, Londres/Domaine public/Wikimédia

157 ph © Archives Charmet/Bridgeman Images

158 ph © De Agostini Picture Lib./G. Dagli Orti/Akg-Images

159 ph © De Agostini Picture Lib./G. Dagli Orti/Akg-Images

160 ph © Bridgeman Images

161 ph © National Maritime Museum, Greenwich/ Leemage

162 ph © Photo Josse/Leemage

163 ph © Bibliothèque nationale de France

164 ph © Bridgeman Images/Leemage

165 ph © Bridgeman Images/Leemage

166 ph © The British Library Board/Leemage

167 ph © The British Library Board/Leemage

168-169 ph © Bridgeman Images

170 ph © Bridgeman Images

172-bd ph © Bibliothèque nationale de France

172-hd ph © Bridgeman Images

172-bg ph © Bridgeman Images

172-hg ph © S. Bianchetti/Bridgeman Images

173-hg ph © Bridgeman Images

173-hd ph © Getty Images/iStock

173-bg ph © Bibliothèque nationale de France

173-mg ph © Bridgeman Images

174 ph © Portrait de James Watt (1736-1819) par Sir William Beechey RA (1753-1839), ca.1802/Heriot-Watt University, Scotland/ArtUK/Domaine public/ Wikimédia

175 ph © Bridgeman Images

176 ph © Pictorial Press Ltd/Alamy Stock Photo

177 ph © Pictorial Press Ltd/Alamy Stock Photo

178 ph © Bridgeman Images

179 ph © Bridgeman Images

180 ph © Bridgeman Images

181 ph © Bibliothèque nationale de France

182 ph © Portrait de Charles Augustin de Coulomb par Louis Hierle/1894/Palais de Versailles/Domaine public/Wikimédia

183 ph © Bridgeman Images

184 ph © Bridgeman Images

185 ph © S. Bianchetti/Bridgeman Images

186 ph © Bridgeman Images

187 ph © Bridgeman Images

188 ph © Granger/Bridgeman Images

189 ph © Bibliothèque nationale de France

190 ph © MP/Leemage

191 ph © Photo Josse/Leemage

192 ph © Pictures From History/Akg-Images

193 ph © Akg-Images

194 ph © The Granger Collection, New York/ Aurimages

195 ph © Nimatallah/Akg-Images

196 ph © Science Photo Library/SHEILA TERRY/ SCIENCE PHOTO LIBRARY/Akg-Images

197 ph © Bridgeman Images

198 ph © http://www.christies.com/Wikimédia

199 ph © Bernard Faye/Mnhn

200 Portrait de Jean-Baptiste de Monet Chevalier de Lamarck par Charles Thévenin/Entre 1802 et 1803/ Domaine public/Wikimédia

201 ph © Service Commun de la Documentation de l'Université de Strasbourg/Collection BNU en dépôt à l'Unistra

202 Wilhelm von Humboldt/Franz Krüger/Domaine public/Wikimédia

203 ph © INTERFOTO/Alamy Stock Photo

204 ph © RMN-Grand Palais (Château de Versailles)/ Franck Raux

205 ph © RMN-Grand Palais (Château de Versailles)/ Franck Raux

206 ph © Bridgeman Images

207 ph © Bridgeman Images

208 ph © Hans Christian Oersted/ETH Library/ Domaine public/Wikimédia

209 ph © Bridgeman Images

211 ph © Museum of Connecticut History, museumofcthistory.org

212 ph © Universal Images Group/Akg-Images

213 ph © Staatsbibliothek Berlin, Preussischer Kulturbesitz, Germany/De Agostini Picture Library/ Bridgeman Images

214 ph © Granger Coll NY/Aurimages

215 ph © Maison d'Auguste Comte

216 ph © Science Photo Library/Akg-Images

217 ph © Bridgeman Images

218 ph © Science Photo Library/Akg-Images

219 ph © Bibliothèque nationale de France

220 ph © Granger Coll NY/Aurimages

221 ph © Otto Sibum/www.beer-studies.com

222 ph © Heritage Images/Leemage

223 ph © 1961, Parke, Davis & Company – Robert A.Thom/http://resource.nlm.nih.gov/101651433

224 ph © Bridgeman Images

225 ph © Akg-Images

226 ph © Bridgeman Images

227 ph © Bridgeman Images

228 ph © Heritage-Images/The Print Collector/Akg-Images

229 ph © Bridgeman Images

230 ph © bilwissedition/Akg-Images

231 ph © Getty Images/iStock

232 ph © The Granger Coll NY/Aurimages

233 ph © The Natural History Museum/Alamy Stock Photo

234 ph © Science Photo Library/Akg-Images

235 ph © Bridgeman Images

236 ph © MP/Leemage

237 Domaine public/Wikimédia

238 ph © Bridgeman Images

239 ph © Bridgeman Images

240 ph © Bridgeman Images

241 ph © Bridgeman Images

242-243 ph © Lee/Leemage

244 ph © Lee/Leemage

246-bg ph © Science Source/Getty Images

246-bm ph © Reproduit avec la permission de l'Institut Cajal, Legado Cajal, Conseil supérieur de la recherche scientifique (CSIC), Madrid

246-hd ph © Akg-Images

246-hm ph © Jacques Boyer/Roger-Viollet

247-hd ph © NIAID/BSIP

247-bd ph © RAND Corporation

247-bg ph © blickwinkel/Alamy Stock Photo

248 ph © Bridgeman Images

249 ph © Bridgeman Images

250 ph © Granger Coll NY/Aurimages

251 ph © Science Source/Getty Images

252 ph © Bridgeman Images

253 ph © Heritage Images/Leemage

254 ph © Portrait de Santiago Ramón y Cajal/Publication par l'Université Clark (1899)/Restauration par Garrondo/Wikimédia/Domaine public

255 ph © Reproduit avec la permission de l'Institut Cajal, Legado Cajal, Conseil supérieur de la recherche scientifique (CSIC), Madrid

256 ph © Bridgeman Images

257 ph © Jacques Boyer/Roger-Viollet

258 Bridgeman Images

259 ph © Victor Lougheed, Popular Mechanics, The Fallacy of the Dirigible, Mars 1912/Google Books

260 ph © Sovfoto/UIG/Leemage

261 ph © Sovfoto/UIG/Leemage

262 Portrait de Marie Curie (vers1900)/Wikimédia/Domaine public

263 ph © Akg-Images

264 Portrait de David Hilbert (vers 1912)/Domaine public/Wikimédia

265 ph © Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach

266 Portrait de Albert Einstein (1921)/Ferdinand Schmutzer/Wikimédia/Domaine public

267 ph © Yann/Wikimédia

268 ph © Bibliothèque nationale de France

269 ph © Bibliothèque nationale de France

270 Portrait de Fritz Haber/The Nobel Foundation/Wikimédia/Domaine public

271 ph © Orientaly/Getty images/iStock

272 Science Source/Akg-Images

273 ph © blickwinkel/Alamy Stock Photo

274 ph © Musée Curie/coll. ACJC

275 ph © Musée Curie/coll. ACJC

276 Coll. Portrait de Arthur S. Eddington (1900)/Bibliothèque du Congrès/Domaine public/Wikimédia

277-g ph © Bridgeman Images

277-d ph © Bridgeman Images

278 ph © Portrait d'Alexander Fleming (1945)/Fondation Nobel/Domaine public/Wikimédia

279 ph © NIAID/BSIP

280 Portrait d'Edwin Hubble/Wikimédia/Domaine public

281 ph © NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), and R. Gendler

282 ph © Akg-Images

283 ph © 2012, The Regents of the University of California, Lawrence Berkeley National Laboratory

284 ph © Association des Collaborateurs de Nicolas Bourbaki

285 ph © Association des Collaborateurs de Nicolas Bourbaki

286 ph © Album/Oronoz/Akg-Images

287 ph © RAND Corporation

288 ph © Artokoloro/Quint Lox/Aurimages

289 ph © Artokoloro/Quint Lox/Aurimages

290 ph © NASA/SDO

291 ph © NASA/SDO

292-293 ph © Red Huber/Orlando Sentinel/MCT via

Getty Images

294 ph © Red Huber/Orlando Sentinel/MCT via Getty Images

296-bd Coll. Project Apollo Archive – NASA

296-hd © Wikimol, Dschwen, Wikimedia CC BY-SA 3.0

296-bm ph © Science Photo Library/Akg Images

296-bg ph © CORBIS/Corbis via Getty Images

297-bd ph © DeepMind

297-hg ph © Michel Gunther/Biosphoto

297-hd ph © Steve Jennings/Getty Images for Breakthrough Prize/AFP

298 ph © Popperfoto/Getty Images

299 ph © Popperfoto/Getty Images

300 Coll. Los Alamos Scientific Laboratory

301 ph © CORBIS/Corbis via Getty Images

302 ph © Hulton Archive/Getty Images

303 ph © Hulton Archive/Getty Images

304 ph © Ullstein Bild via Getty Images

305 ph © Universal History Archive/UIG via Getty Images

306 ph © Science Photo Library/Akg Images

307 ph © Science Photo Library/Akg Images

308 ph © Bettmann Archive/Getty Images

309 ph © Bettmann Archive/Getty Images

310 ph © DR

311 Coll. The Port Authority of New York and New Jersey

312 ph © Sputnik/Akg-Images

313 Coll. IM/KHARBINE-TAPABOR

314 ph © Laurent MAOUS/GAMMA-RAPHO

315 ph © Jack GAROFALO/PARISMATCH/SCOOP

316 ph © SMITHSONIAN INSTITUTION/SCIENCE PHOTO LIBRARY/Akg-Images

317 ph © Craig Hartley/Bloomberg via Getty Images

318 ph © Alfred Eisenstaedt/The LIFE Picture Collection via Getty Images/Getty Images

319 Coll. NARA – NWDNS-44-PA-1737

320 Coll. MIT Museum

321 © Wikimol, Dschwen, Wikimedia CC BY-SA 3.0

322 ph © DR

323 ph © David M. Phillips/SCIENCE SOURCE/BSIP

324 ph © Oleh_Slobodeniuk/Istockphoto

325 ph © Oleh_Slobodeniuk/Istockphoto

326 ph © Courtesy of the Computer History Museum

327 ph © Courtesy of the Computer History Museum

328 Coll. Project Apollo Archive – NASA

329 Coll. Project Apollo Archive – NASA

330 ph © Xinhua/Jin Liwang/AFP

331 ph © Science Photo Library/Getty Images

332 © Apple – DR

333 © Apple – DR

334 ph © NASA

335-b ph © NASA

335-h ph © NASA/JPL

336 ph © Maximilien Brice/CERN

337 ph © Maximilien Brice/CERN

338 ph © Album/Akg-Images

339 ph © Michel Gunther/Biosphoto

340 ph © SHONE/GAMMA

341 ph © SHONE/GAMMA

342 © NOAA/GFDL

343 © NOAA/GFDL

344 ph © DR

345 ph © NRC-HIA, Christian Marois, W.M. Keck Observatory

346 ph © JOKER/Karl-Heinz Hick/ullstein bild via Getty Images

347 ph © JOKER/Karl-Heinz Hick/ullstein bild via Getty Images

348 ph © Steve Jennings/Getty Images for Breakthrough Prize/AFP

349 ph © Steve Jennings/Getty Images for Breakthrough Prize/AFP

350 ph © DeepMind

351 ph © DeepMind

352 ph © Gerd Altmann/Pixabay

353 ph © Gerd Altmann/Pixabay

354 ph © Ociacia/iStockphoto

355 ph © Ociacia/iStockphoto

D. R. : Malgré nos efforts, il nous a été impossible de joindre certains photographes ou leurs ayants droits, ainsi que les éditeurs ou leurs ayants droits pour certains documents, afin de solliciter l'autorisation de reproduction, mais nous avons naturellement réservé en notre comptabilité des droits usuels.

Photos de couverture

- Albert Einstein met en garde contre la production de la Bombe H, 17 février 1950, ph © Bridgeman Images
- Puce intégrée sur une carte mère. ph © Edelweiss/Adobe Stock
- Marie Curie, 1906, Paris, France. ph © SZ Photo/Scherl/Bridgeman Images
- *Galilée présente sa lunette astronomique au Doge Leonardo Donato,* 1858, Villa Ponti Varese Italie. ph © ART Collection/Alamy Stock Photo

Bescherelle

CHRONOLOGIE

L'HISTOIRE DES SCIENCES

Le récit de l'histoire des sciences et des techniques, des origines à nos jours

- Pour chaque période, une vision d'ensemble des événements qui ont marqué l'histoire des sciences et des techniques dans le monde.
- Au fil des doubles pages, un récit vivant de chaque événement dans une présentation simple et accessible.
- Un voyage à travers le temps, avec des frises chronologiques, des encadrés et des dossiers sur des découvertes majeures.

Couverture : Jean-Marc Denglos

Les chronologies Bescherelle

19,90 € P.V. France
87 0892 5
ISBN 978-2-401-04752-5